

02;11

## **Возможность оценки температуры подложки по характеру автоионного изображения адсорбированной на ней молекулы**

© С.В. Зайцев

ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики,  
Москва  
E-mail: Sergey.Zaitsev@itep.ru

Поступило в Редакцию 2 июля 2002 г.

Единичные молекулы с высокими дипольными моментами (вода, нафталин) осаждались из газовой фазы на проводящий образец под действием неоднородного электрического поля, перпендикулярного к поверхности. Установлено, что они дают различное изображение на экране автоионного микроскопа в зависимости от температуры подложки и напряженности электрического поля. Таким образом, оказывается возможным по „внешнему виду“ молекулы оценить ее температуру (и температуру подложки) или, наоборот, зная температуру подложки и напряженность поля, идентифицировать молекулу. Предлагается предварительное объяснение этих эффектов строить на основе рассмотрения молекулы как гироскопа, испытывающего нутацию. Вследствие уникальной локальности метода, его, вероятно, можно будет применять в нанотехнологии и при исследовании тонких теплофизических эффектов на поверхности твердых тел.

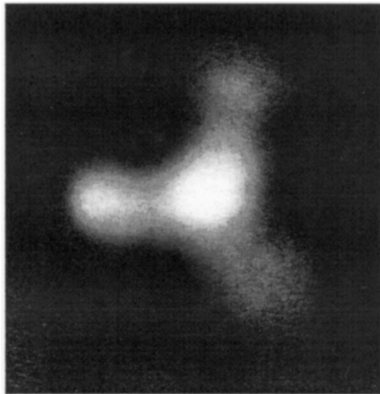
Миниатюризация является одной из главных тенденций современной техники. Предполагается, что на основе развития нанотехнологии удастся решить многие глобальные технические проблемы современности. Прогресс нанотехнологии предполагает, в частности, развитие все более локальных методов измерения температуры. Так, японские исследователи предложили нанотермометр на основе углеродной нанотрубки, заполненной галлием [1]. Вся конструкция синтезировалась в едином процессе, а наблюдение за столбиком галлия, перемещающимся внутри нанотрубки при изменении температуры в пределах 50–500°С

проводили в сканирующем туннельном микроскопе. Длина термометра составила  $10\ \mu\text{m}$ , а диаметр  $75\ \text{nm}$ .

В данной работе показано, что размеры термометра можно значительно уменьшить, если в качестве термометрического тела использовать одну молекулу. Это позволит уменьшить искажение исходного температурного поля исследуемого нанообъекта. Чем меньше элементов содержит рассматриваемая подсистема, тем большие относительные флуктуации в ней возможны. Поэтому, наблюдая за отдельной молекулой в газе, невозможно судить о его температуре. В твердом теле молекула „зажата“ в кристаллической решетке и гораздо сильнее связана с системой, с большей скоростью обменивается энергией с соседними молекулами. Поэтому, усредняя „по времени“, в этом случае возможно определить температуру всего образца по одной молекуле. Однако следить за размахом и частотой колебаний отдельных молекул внутри твердого тела пока не представляется возможным.

В особых условиях находятся молекулы, адсорбированные на поверхности твердого тела. Здесь кроме колебательных у них появляются и вращательные степени свободы. С одной стороны, молекула может эффективно обмениваться энергией с подложкой, а с другой — ее можно наблюдать и даже оказывается возможным оценить размах и частоту колебаний. В данной работе для этого была использована методика автоионной микроскопии [2].

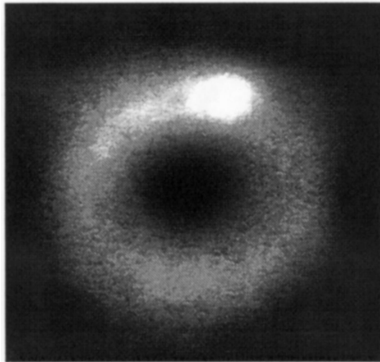
Эксперименты проводились с образцами в форме микроострий с диаметром при вершине  $50 \div 1000\ \text{nm}$  из вольфрама, молибдена, нержавеющей стали, которые изготавливались по методу, описанному в [3]. В вакуумную камеру запускали гелий до давления  $10^{-3}\ \text{Pa}$  и следы молекул с относительно высоким дипольным моментом, например воды или нафталина. Затем на микроострие плавно повышали положительный электрический потенциал. Молекулы с большим дипольным моментом, оказавшиеся в области сильного неоднородного электрического поля вблизи вершины микроострия, эффективно притягивались к его поверхности. У свободного конца молекулы, осевшей на поверхность, напряженность поля оказывалась локально повышенной по сравнению со средней на поверхности. Здесь и происходила ионизация атомов „изображающего газа“ — гелия. Положительные ионы гелия летели к заземленному экрану и создавали на нем изображение (перед экраном была установлена сборка из микроканальных пластин — ионно-электронных преобразователей, усиливающих яркость в  $10^8$  раз). Обыч-



**Рис. 1.** Изображение молекулы воды при комнатной температуре.

но изображение молекулы представляет из себя просто яркое пятно на экране. Но если достаточно плавно изменять величину электрического потенциала, то при минимальном его значении, необходимом для того, чтобы молекула еще не отрывалась от поверхности, ее изображение становится более сложным. На рис. 1 показано соответствующее изображение молекулы при комнатной температуре. Если зафиксировать потенциал и охлаждать образец от комнатной до температуры жидкого азота (путем заполнения жидким азотом соединенной с держателем образца емкости) в процессе наблюдения, изображение молекулы меняется скачками, проходя через ряд устойчивых состояний. Установить температуры, при которых происходят эти скачки, пока не удалось, так как температура подложки — вершины микроострия при переходных процессах не была точно известна. Однако из рис. 1 (комнатная температура) и рис. 2 (температура жидкого азота) видно, что изображения молекулы при комнатной температуре и при температуре жидкого азота можно различить совершенно отчетливо. Характерным признаком является, например, наличие или отсутствие светлого пятна в середине изображения.

Наиболее простое объяснение наблюдаемым эффектам, по-видимому, можно дать, основываясь на представлениях о том, что молекула в данных условиях уподобляется гироскопу с одной закрепленной



**Рис. 2.** Изображение молекулы воды при температуре жидкого азота.

точкой. В случае, когда частоты вращения молекулы вокруг собственной оси и вокруг оси, перпендикулярной к поверхности, оказываются кратными, возникает явление гироскопической нутации [4]. Оно состоит в том, что свободный конец гироскопа при вращении оказывается в одних точках пространства всегда в „верхнем“ положении и дает более яркое изображение, а в других — в „нижнем“. Однако не все экспериментальные результаты удовлетворяют такому простому объяснению. По-видимому, необходимо развитие квантово-механической модели, описывающей вибрацию молекулы на поверхности, обменивающейся единичными квантами энергии с поверхностью.

Вышеуказанный эффект может представлять интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения. Появляется уникальная возможность контролировать эти элементарные процессы. Представляется важным определить частоты колебаний молекул и изучить вопрос об излучаемой ими электромагнитной энергии (преобразовании тепловой энергии в электромагнитную). Не исключено, что с помощью специальным образом подобранных мономолекулярных пленок, находящихся в электрическом поле, возможно будет регулировать процессы поглощения и излучения поверхностью электромагнитной энергии. В практическом отношении можно предположить его применение для определения температур в нанотехнологических конструкциях.

Кроме того, если составить базу данных об изображениях различных молекул при точно определенных температурах и напряженностях электрического поля, будет возможным проводить визуальный контроль химической природы одной молекулы без ее разрушения.

В ближайшее время за счет использования усовершенствованной автоионной и атомно-зондовой методики окажется возможным провести на основе данного подхода существенно более детальные исследования реакций отдельных молекул с субмолекулярных пленок на изменения температуры и другие физические воздействия (например, лазерного излучения, бомбардировки медленными частицами и т. д.).

## Список литературы

- [1] *Yihua Gao, Yoshio Bando* // Nature. 2002. V. 415. P. 599–600.
- [2] *Миллер М., Смит Г.* Зондовый анализ в автоионной микроскопии. М.: Мир, 1993. 304 с.
- [3] *Зайцев С.В., Карпов А.В.* // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 4. С. 144–147.
- [4] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика. М.: Наука, 1965. 203 с.