

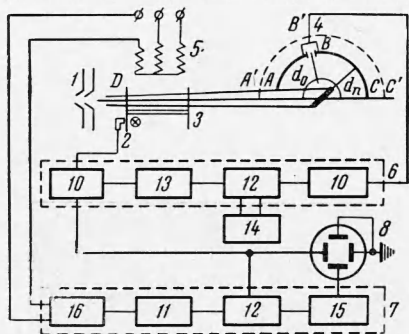
## ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГООБМЕНА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОТОКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ

В. В. Леонас

(Москва)

Описан метод прямого изучения энергообмена молекулярного потока с поверхностью твердого тела. Проведены измерения энергетических потерь частиц ( $\text{Ar}$ ,  $\text{CO}_2$ ) при столкновении с поверхностью металла ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ta}$ ) при различных температурах. Обнаружен захват и измерены времена задержки молекул на этих поверхностях.

Возможность непосредственного исследования эффектов взаимодействия молекул с поверхностью открывается при использовании метода молекулярного пучка [1]. В приложении к изучению энергообмена метод состоит в получении коллимированного пучка атомов (или молекул), бомбардировке им исследуемой поверхности и регистрации изменения энергии частиц в результате столкновения. Потери энергии можно, очевидно, определить, если при известной скорости падающих частиц удалось



бы измерить скорость отраженных. По величине этой скорости можно, пренебрегая внутренними степенями свободы, судить о полной энергии отлетающих частиц и таким образом оценивать энергетические потери при столкновении. Обеспечивая возможность прямых измерений энергообмена и тем самым существенно упрощая интерпретацию получаемых данных, метод молекулярного пучка может в принципе позволить также более тщательно контролировать состояние исследуемой поверхности (работа в глубоком вакууме, повышение температуры образца, резкое ускорение процесса измерения (см., например, [2])).

Описание использованной в работе экспериментальной установки сделано в [3],

и здесь рассматривается лишь схема измерения и узлы установки, непосредственно связанные с измерениями. На фигуре представлена блок-схема измерительной части, здесь 1 — источник молекулярного пучка, 2 — датчик начала отсчета времени, 3 — механический селектор молекул по скоростям, 4 — подвижный ионизационный приемник пучка, 5 — статорные обмотки селектора, 6 — электронные схемы измерения, 7 — электронная схема стабилизации частоты вращения селектора, 8 — осциллограф для контроля постоянства частоты вращения селектора, 9 — исследуемый образец в виде пластины, 10 — резонансный усилитель, 11 — усилитель мощности, 12 — синхронный детектор, 13 — фазовращатель, 14 — регистрирующий прибор, 15 — задающий генератор, 16 — реле, A, B, C — различные положения приемника при измерениях. Пластина ( $20 \times 2 \times 0.5$  мм) крепилась на подвижных салазках и могла поворачиваться вокруг своей оси, совпадавшей с осью вращения приемника. При помощи электронного пучка от укрепленного за ней оксидного катода пластина могла нагреваться до температуры порядка тысячи градусов. Температура измерялась либо пирометром, либо термопарой.

Для селектора выбирался ряд строго фиксированных частот вращения, что позволяло в диапазоне от 1100 до 1520 м/сек ступенчатым образом менять скорости частиц монокинетического пучка. Более подробное описание работы селектора и системы регистрации можно найти в [4,5].

Рассмотрим теперь метод измерения скоростей. Помимо измерения при помощи селектора, скорость частиц может определяться по времени пролета известной базы. Так, если провести последовательные измерения времени пролета расстояний (фигура) DA, DC, DB, DB', то можно определить как скорость падающих и отходящих от пластины частиц, так и время задержки молекул на поверхности. В самом деле, разность времен для расстояний DA и DC равна времени пролета точно известного расстояния AC (имевшее место в опытах совпадение значений скорости, измеренных таким образом и рассчитанных по частоте вращения селектора, будет хорошей проверкой надежности измерений). Аналогично, разность времени для DB и DB' — время пролета известного расстояния BB', позволяющее найти скорость частиц, отлетевших от поверхности.

Если измеренное время пролета расстояния AB не равно времени, рассчитанному по известной скорости, то разность равна времени задержки молекул на поверхности. При отсутствии задержки молекул на поверхности измерение времени пролета для

расстояния  $AB$  позволяет измерять потери скорости в результате столкновения частиц с поверхностью (коэффициент аккомодации); в случае захвата аккомодация, очевидно, будет полной. Время пролета определялось по величине временного сдвига импульсов ионного тока относительно синхронных импульсов фототока, которые фиксируют начало отсчета времени. В целях удобства проведения измерений последовательности импульсов преобразовывались в напряжения синусоидальной формы, при этом временной сдвиг определялся путем сравнения фаз.

Измерение времен (сдвига фаз) осуществлялись нуль-методом, при котором при помощи специального фазовращателя в один из каналов синхронного детектора, являющегося нуль-индикатором, вводится эталонный сдвиг фазы (фигура). Применяв инерционный индикатор (типа синхронного детектора), удалось сохранить большую чувствительность даже при наличии флуктуационных помех.

Применение фазового метода с преобразованием последовательности импульсов в синусоидальное напряжение требует постоянства формы импульсов ионного тока, создаваемых сгустками падающих и отлетевших от поверхности частиц. В случае однородности скоростей отлетающих частиц искажения формы, очевидно, не происходит. В другом крайнем случае — максвелловского распределения скоростей этих частиц — можно учесть появляющийся дополнительный сдвиг фаз.

Рассмотрим теперь основные результаты, полученные при бомбардировке технических поверхностей металлов (Cu, Fe, Ta) пучками Ag, CO<sub>2</sub>. Измерения времени пролета расстояния  $BB'$  для отлетающих частиц показали, что при всех возможных комбинациях газ — поверхность величина измеренной скорости соответствует средней скорости молекул при температуре поверхности. Так, при температуре поверхности 300° K рассчитанная по времени пролета скорость составляла 430 м / сек для пучка Ag, 410 м / сек — для пучка CO<sub>2</sub>; при повышении температуры до 1100° K соответствующие скорости равнялись 820 и 780 м / сек. Так как измеренные скорости отлетающих частиц для падающих частиц различной энергии отличались не более чем на 10% (такого же порядка и ошибка измерений), то приведенные выше значения соответствуют средним арифметическим для различных скоростей подхода частиц.

Для суждения об энергообмене по данным измерения скорости необходимо знать распределение отраженных частиц по скоростям. Имея в виду монокинетичность падающих частиц, можно полагать, что измеренная скорость характеризует среднюю скорость молекул отраженного потока. Косвенным подтверждением этого может являться обнаруженная в опытах независимость скорости отлетающих частиц от угла вылета с поверхности и равенство суммарного потока отлетающих частиц (суммы ионных токов лучей, отходящих в разных направлениях) падающему потоку (ионному току падающего пучка).

Таким образом, если результаты измерения скоростей интерпретировать в терминах коэффициента аккомодации, то можно полагать, что имеет место полная термическая аккомодация. Полученные результаты позволяют заключить, что полная термическая аккомодация имела место и при повышенных температурах.

Если сопоставить этот результат с данными [6], полученными методом нити, то можно отметить, что для последних полная аккомодация практически никогда не наблюдалась. Причиной этого расхождения могут, по-видимому, являться значительные различия вакуумных условий сравниваемых экспериментов.

Во второй серии опытов измеренное время пролета расстояния  $DB$ , сравнивалось с временем, рассчитываемым по измеренным значениям скорости падающих и отраженных частиц. Было обнаружено, что первое заметно превышает второе. Причиной различия может являться только захват и задержка молекул на поверхности. Таким образом, это сравнение позволяет заключить о захвате молекул на поверхности и найти (с учетом влияния искажения формы импульса) величину времени задержки молекул на поверхности пластины.

Времена задержки, также являющиеся средними арифметическими для частиц различной начальной скорости при температуре поверхности 300° K в случае пучка Ag равнялись 31 мксек — для Cu, 41 мксек — для Fe и 49 мксек — для Ta. Для случая CO<sub>2</sub> эти времена равнялись соответственно 36, 43, 46 мксек. С повышением температуры время задержки, как показывают измерения, меняется мало. Так, при повышении температуры поверхности до 1100° K времена для пучка Ag оказались равными 23 мксек (Cu), 34 мксек (Fe), 44 мксек (Ta), а для пучка CO<sub>2</sub> соответственно — 23, 35, 44 мксек. По измеренным временам задержки при помощи известного [6] соотношения можно найти энергию адсорбции. Ее величина, практически не меняющаяся с температурой, оказалась равной 1.8 эв.

В связи с измерениями времени задержки необходимо заметить, что для используемого метода оно не должно превышать периода повторения импульсов. В противном случае истинная продолжительность задержки может оказаться больше измеряемой на неопределенную величину, кратную периоду повторения. Такую возможность, однако, следует отбросить, поскольку при этом измеряемое время задержки зависело бы от частоты вращения селектора, чего в экспериментах не обнаружено.

Автор благодарит Н. В. Камышова, принимавшего участие в выполнении настоящей работы.

Поступила 20 V 1963

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рамзей Н. Молекулярные пучки. Изд. иностр. лит., 1960.
2. Арифов У. А. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью металлов. Изд-во АН УзССР, Ташкент, 1961.
3. Леонас В. Б. Изучение взаимодействия молекулярного пучка со стенкой. ПМТФ, 1962, № 6, стр. 39.
4. Леонас В. В., Рубцов В. К. Селектор для исследования скоростей молекул. Приборы и техн. эксперим., 1960, № 2, стр. 115.
5. Леонас В. Б. Детектирование пучков нейтральных молекул. Приборы и техн. эксперим., 1962, № 3, стр. 127.
6. Де-Бур Я. Динамический характер адсорбции. Изд. иностр. лит., 1962.

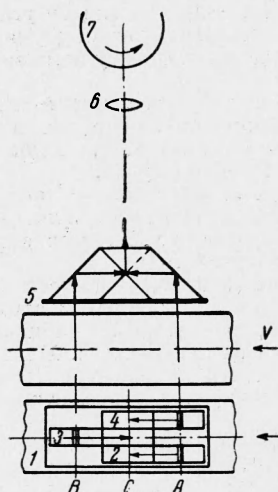
### ОБ ИЗМЕРЕНИИ СКОРОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ

Ю. В. Еремин, А. М. Трохан

(Новосибирск)

Описывается фотографический метод измерения скорости светящихся газовых потоков, использующий временной сдвиг флюктуаций яркости плазменной струи. Используется система призм и диафрагм для выделения двух сечений в потоке.

Для потоков, флюктуации светимости газа которых являются периодической функцией времени, дается описание прибора, основанного на измерении интервала времени между приходом фронта светящегося сгустка в две точки, смещенные на некоторое расстояние вдоль по потоку. Световые сигналы преобразуются в электрические и подаются в систему, преобразующую их в импульсы фиксированной амплитуды и частоты, длительность которых пропорциональна времени пролета, т. е. обратно пропорциональна скорости движения сгустков.



Фиг. 1

Обычно для измерения скорости плазменных струй, получаемых при помощи электродуговых подогревателей, используют метод поперечной фоторазвертки [1,2]. Для определения скорости этим методом находят угол наклона полос на фоторегистрограмме, соответствующих движению флюктуаций яркости. В ряде случаев оказывается более удобным измерять не угол наклона, а линейный сдвиг. С этой целью была использована следующая схема регистрации движения флюктуаций яркости плазменной струи (фиг. 1).

Вблизи исследуемого потока 1 устанавливаются три призмы 2, 3, 4 и диафрагма 5 со щелевыми отверстиями. Свет из двух сечений потока A и B, выделяемых диафрагмой, при помощи призм совмещается в сечении C и объективом 6 проецируется на пленку, закрепленную во вращающемся барабане 7. Флюктуации светимости в сечении B запаздывают по отношению к флюктуациям в сечении A, поэтому на пленке получается сдвиг  $x$  между соответствующими флюктуациями почернения. Измерив величину сдвига  $x$ , можно найти скорость потока  $V = Lw / x$ , где  $L$  — расстояние между сечениями A и B,  $w$  — скорость движения пленки.

На фиг. 2 приведен пример регистрограммы, полученной таким образом.

Направление движения пленки совпадает с направлением потока, поэтому можно регистрировать флюктуацию одновременно в нескольких точках, расположенных по сечению потока. Для этого используются две широкие призмы, повернутые на  $45^\circ$  относительно направления развертки. Подобный метод позволяет найти также пульсации скорости по времени [3].