

ТЕХНИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

Вычисление парциальных давлений

Анализаторы остаточных газов используются в вакуумных исследовательских приложениях уже в течение 25 лет. За последние 10 лет их роль изменилась, и они эволюционировали из исключительно исследовательского прибора в производственный инструмент. Применение анализатора остаточных газов на производстве может способствовать повышению производительности, увеличению выпуска годных изделий, пропускной способности и снижению издержек, а в итоге – увеличению прибыли.

Однако пользователь самостоятельно должен определить, как прибор наилучшим образом может удовлетворить потребностям конкретного приложения. В данном техническом документе рассмотрено определение и вычисление парциальных давлений.

КАК РАБОТАЕТ АНАЛИЗАТОР ОСТАТОЧНЫХ ГАЗОВ?

Анализатор остаточных газов измеряет парциальные давления отдельных газов в смеси. В состав анализатора остаточных газов входят: датчик, работающий в условиях высокого вакуума, электроника, управляющая датчиком, и программное обеспечение, выполняющееся на внешнем компьютере, для отображения данных и управления электроникой.

Датчик анализатора остаточных газов состоит из трёх компонентов:

Источник ионов: Источник ионов содержит нагреваемый катод, испускающий электроны. Эти электроны сталкиваются с молекулами газа в вакуумной системе, передавая им электрический заряд и превращая в ионы:

1. Отрыв одного электрона от молекулы превращает её в родительский молекулярный ион.
2. Могут образовываться многозарядные ионы, если энергия бомбардирующего электрона достаточна для отрыва нескольких электронов от молекулы или атома.
3. Энергия бомбардирующего электрона достаточна для разрыва химических связей и отрыва электрона (одного или нескольких) с образованием фрагментированных ионов.

Квадрупольный фильтр масс: Ионы, образованные в источнике ионов, направляются электрическим полем в квадрупольный фильтр масс для разделения в зависимости от отношения их массы к заряду.

Детектор ионов: Ионы, прошедшие через квадрупольный фильтр масс, попадают в детектор и сталкиваются с чувствительным элементом, при этом происходит их нейтрализация и возбуждается ток, который позволяет идентифицировать компонент, присутствующий в газовой смеси, а величина создаваемого тока пропорциональна количеству определённого газа в смеси.

Блок электроники анализатора остаточных газов, в котором реализована конструкция «интеллектуального датчика», интерпретирует выходной сигнал датчика для отображения в системном ПО на внешнем компьютере. Это системное ПО используется для мониторинга и статистического управления технологическим процессом, а также для выполнения процедур техобслуживания, например калибровки по массам.

ЧТО ТАКОЕ ПАРЦИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ?

Анализаторы остаточных газов можно использовать для определения характеристик газовой смеси, обнаруженной в условиях вакуума. «Парциальное давление» - это измерение абсолютного давления отдельного компонента такой смеси. Сумма парциальных давлений всех компонентов определяет полное давление в системе. Анализатор остаточных газов сконструирован так, что высота отображаемого пика пропорциональна парциальному давлению вещества, ионы которого сформировали этот пик.

КАК ВЫЧИСЛЯЕТСЯ ПАРЦИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ?

Ниже приведены вывод уравнения для вычисления парциального давления, а также объяснения и определения параметров, используемых для получения этого уравнения.

Это уравнение отражает взаимосвязь между парциальным давлением и определяющим его ионным током:

$$PP_A = (MF_{AB} \times A_B) \times I_{AB}$$

Где: PP_A = парциальное давление вещества "А", измеряемое в торр

MF_{AB} = коэффициент материала для конкретного вещества

A_B = коэффициент анализатора

I_{AB} = ионный ток для пика массой "В", созданный ионами вещества "А", измеряемый в амперах

Коэффициент материала MF_{AB} зависит от характера фрагментации конкретного вещества и газа сравнения (который является частью полного потока ионов вещества "А" с массой "В" и обозначается FF_{AB}) и лёгкости, с которой это вещество ионизируется по отношению к эталонному газу при одинаковом парциальном давлении (называется вероятностью ионизации и обозначается XF_A). Это соотношение определяется следующим выражением:

$$MF_{AB} = FF_{N28} / (FF_{AB} \times XF_A), \text{ где}$$

FF_{N28} – относительная распространённость ионов массой 28 а.е.м. молекул газа сравнения N2 (азот). Коэффициенты материала для многих газов уже вычислены и сохранены как «Material Factors» для использования в режиме мониторинга избирательных пиков (Selected Peak) в ПО TranspectorWare и TWare 32TM.

Обратите внимание, коэффициенты фрагментации будут отличаться в зависимости от источника ионов, энергии электронов и настройки калибровки по массам. Чтобы обеспечить наиболее высокую точность, эти коэффициенты необходимо измерять с помощью того же прибора и в аналогичных условиях. Вероятности ионизации можно оценить путём подстановки относительной чувствительности ионизационного датчика для определённого газа. Эти коэффициенты также можно измерить путём сравнения значения, измеренного ионизационным датчиком с горячим катодом, с известным значением давления.

Коэффициент анализатора A_B зависит от нескольких факторов, а именно:

$$A_B = 1 / (TF_B \times DF_{AB} \times G \times S), \text{ где}$$

TF_B – коэффициент пропускания квадруполя для элемента массой "В". Этот коэффициент определяет долю ионов массой "В", которые проходят через квадруполь, по отношению к ионам азота массой 28 а.е.м. Номинальный $TF = (28/M)$.

DF_{AB} – коэффициент регистрации. Этот коэффициент равен 1 при использовании цилиндра Фарадея в качестве детектора. Для ВЭУ коэффициент DF зависит от массы иона и его химических свойств и измеряется относительно коэффициента для газа сравнения (как правило, азота). Общая тенденция такова,

что с увеличением массы иона коэффициент регистрации ВЭУ уменьшается. В ПО TWare 32 используется $DF_{AB} = (28/M)^{0,3}$.

G – это коэффициент усиления ВЭУ, измеряется как отношение выходного тока ВЭУ к выходному току ЦФ. Коэффициент усиления **G** для ВЭУ зависит от рабочего напряжения и состояния ВЭУ. При использовании ЦФ в качестве детектора, $G = 1$.

S – чувствительность измерительного прибора, измеряется в А/торр при использовании ЦФ в качестве детектора по ионному току, создаваемому ионами чистого азота массой 28 а.е.м. при заданном давлении. Для ВЭУ **S** зависит от рабочего напряжения и состояния ВЭУ.

Коэффициент анализатора A_B зависит от параметров заданной программы анализа и самого анализатора с тем, чтобы ПО TranspectorWare или TWare 32 было способно внутренним образом вычислить A_B и использовать его вместе с коэффициентом материала для молекул газов, идентифицированных в режиме избирательных пиков, для непосредственного отображения парциального давления.

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ВЫЧИЛЕНИЯ ПО НЕОБРАБОТАННЫМ ДАННЫМ

С учётом приведённых выше определений, уравнение для парциального давления вещества "А", характеризуемого амплитудой (I) сигнала иона массой "В", принимает следующий окончательный вид:

$$PP_A = \{FF_{N28} / (FF_{AB} \times XF_{AB} \times TF_B \times DF_{AB} \times G \times S)\} \times I_{AB}$$

Значения констант в этом уравнении можно найти в таблицах или измерить для конкретного прибора. Ниже приведена таблица коэффициентов для некоторых распространённых газов. Больше значений коэффициентов и констант можно найти в руководстве по эксплуатации прибора Transpector и других справочных материалах.

Вещество	FF коэффициент фрагментации	XF вероятность ионизации	MF коэффициент материала
Аргон, Ar			
40	0,83	1,2	1,00
20	0,17		
Углекислый газ, CO₂			
44	0,70	1,4	1,02
28	0,11		
16	0,06		
12	0,01		
Гелий, He			
4	1,00	0,14	7,14
Водород, H₂			
2	1,00	0,44	2,27
Криптон, Kr			
84	0,45	1,7	1,31
86	0,13		
82	0,10		
83	0,10		
Азот, N₂			
28	0,93	1,0	1,08
14	0,06		
29	0,01		

Вещество	FF коэффициент фрагментации	XF вероятность ионизации	MF коэффициент материала
Кислород, O ₂			
32	0,95	1,0	1,05
16	0,05		
Вода, H ₂ O			
18	0,75	1,0	1,33
17	0,19		
1	0,05		
16	0,02		

Расчёты в примерах можно выполнить, используя эти значения коэффициентов и формулы.

ПРИМЕР 1

Вакуумметр показывает эквивалентное давление азота 2,5E-5 торр, а анализатор остаточных газов измерил значение 5E-9 А для азота и 7,3E-11 А для воды в режиме использования ЦФ в качестве детектора. Какое парциальное давление воды (в торр)?

Начнём с уже выведенного уравнения для парциального давления:

$$PP_A = \{FF_{N28} / (FF_{AB} \times XF_{AB} \times TF_B \times DF_{AB} \times G \times S)\} \times I_{AB}$$

Константы в этом уравнении должны иметь следующие значения:

$$FF_{N28} = 1,00 \text{ (как указано в таблице для азота)}$$

$$FF_{AB} = 0,75 \text{ (как указано в таблице для воды массой 18 а.е.м.)}$$

$$XF_{AB} = 1,00 \text{ (как указано в таблице для воды)}$$

$$TF_B = 28/M = 28/18 = 1,56 \text{ (для воды массой 18 а.е.м.)}$$

$$DF_{AB} = 1,0 \text{ (для цилиндра Фарадея в качестве детектора)}$$

$$G = 1,0 \text{ (для цилиндра Фарадея в качестве детектора)}$$

$$S = 5E-9 \text{ А} / 2,5E-5 \text{ торр} = 2E-4 \text{ А/торр}$$

$$I_{AB} = 7,3E-11 \text{ А (как указано в этом примере)}$$

Следовательно,

$$PP_{H2O} = \{1,00 / (0,75 \times 1,00 \times 1,56 \times 1,00 \times 1,00 \times 2E-4 \text{ А/торр})\} \times 7,3E-11 \text{ А}$$

или

$$PP_{H2O} = 3,12E-7 \text{ торр}$$

ПРИМЕР 2

Используем систему из примера 1 и предполагаем одинаковую чувствительность. Анализатор остаточных газов измерил значение 5E-7 А для азота и 5,4E-9 А для кислорода в режиме использования ВЭУ в качестве детектора. Какое парциальное давление кислорода (в торр)?

Вновь начнём с уже выведенного уравнения для парциального давления:

$$PP_A = \{FF_{N28} / (FF_{AB} \times XF_{AB} \times TF_B \times DF_{AB} \times G \times S)\} \times I_{AB}$$

Константы в этом уравнении должны иметь следующие значения:

$$FF_{N28} = 1,00 \text{ (как указано в таблице для азота)}$$

$$FF_{AB} = 0,95 \text{ (как указано в таблице для кислорода массой 32 а.е.м.)}$$

$$XF_{AB} = 1,00 \text{ (как указано в таблице для кислорода)}$$

$$TF_B = 28/M = 28/32 = 0,875 \text{ (для кислорода массой 32 а.е.м.)}$$

$$DF_{AB} = (28/M)^{0,3} \text{ пусть будет равно } 1,00 = (28/32)^{0,3} = 0,96$$

$$G = 5E-7 \text{ А} / 5E-9 \text{ А (ионный ток ЦФ из примера 1)} = 100$$

$$S = 2E-4 \text{ А/торр (как вычислено в примере 1)}$$

$$I_{AB} = 5,4E-9 \text{ А (как указано в этом примере)}$$

Следовательно,

$$PP_{O_2} = \{1,00 / (0,95 \times 1,00 \times 0,875 \times 0,96 \times 100 \times 2E-4 \text{ А/торр})\} \times 5,4E-9 \text{ А}$$

или

$$PP_{O_2} = 3,38E-7 \text{ торр}$$

Как показано выше количественные характеристики системы анализа остаточных газов можно использовать для вычисления парциального давления отдельного компонента в смеси газов. Эти данные можно использовать для тщательного мониторинга и эффективного управления техпроцессом, а также для ориентирования пользователя с целью максимально эффективного использования анализатора остаточных газов.

¹⁾ "Mass-Dependent Effects of Channel Electron Multipliers in Residual Gas Analyzers", Journal of Vacuum Science and Technology A 5 (4), Reagan/Frees. («Эффекты, зависимые от массы, в микроканальных ВЭУ анализаторов остаточных газов», журнал вакуумной науки и технологии A 5 (4), Reagan/Frees.



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ГЛАВНЫЙ ОФИС: Two Technology Place, East Syracuse, NY 13057 USA (США)

Тел.: +1.315.434.1100

Факс: +1.315.437.3803

Эл. почта: reachus@inficon.com

США ФРАНЦИЯ ГЕРМАНИЯ ЛИХТЕНШТЕЙН ШВЕЙЦАРИЯ ВЕЛИКОБРИТАНИЯ
КИТАЙ ЯПОНИЯ КОРЕЯ СИНГАПУР ТАЙВАНЬ

Контактную информацию и сведения о представительствах нашей компании в других регионах мира см. на нашем веб-сайте:
www.inficon.com

Tware 32 является торговым знаком компании INFICON Inc.