

Энн Мари
Диксон Хизман,
Др. Дэвид Энсор
Научное редактирование
Михаила Шахова

МОНИТОРИНГ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ В ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ: ISO 14644-12¹

Статья опубликована в журнале Journal of the IEST, V. 62, 2019
(www.iestjournal.org)

Данная статья представляется читателям из серии информационных материалов, подготовленных руководителями ISO/TC 209 для разъяснения и продвижения расширяющегося набора стандартов, разрабатываемых ISO/TC 209.

Аннотация

Технический комитет (*Technical Committees* – TC) 209 в составе Международной организации по стандартизации (*International Organization for Standardization* – ISO) отвечает за разработку нормативных документов по чистым помещениям и связанным с ними контролируемыми средам. Разработана серия из 15 международных стандартов (тринадцать частей ISO 14644 и две части ISO 14698) о контроле загрязнений средствами технологии чистых помещений. В стандартах рассматривается проектирование, классификация, мониторинг и вспомогательные операции в чистых помещениях.

В последнем опубликованном комитетом стандарте ISO 14644-12 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 12. Технические требования к мониторингу чистоты воздуха по концентрации наноразмерных частиц» рассматривается мониторинг наноразмерных частиц (наночастиц) размером менее 100 нм при помощи конденсационного счётчика частиц (счётчика ядер конденсации) или аналогичного прибора. Кроме того, в стандарте приводятся рекомендации по идентификации вкладов источников загрязнений в общую нагрузку помещения по аэрозольным частицам.

Источники наноразмерных частиц в основном относятся к процессам, проходящим в чистом помещении. Стандарт содержит примеры параметров работы оборудования и информацию по применению этих данных. Документ предназначен для инженеров-технологов и специалистов по чис-

тым помещениям. Предполагается, что по мере развития нанотехнологий стандарт найдёт свое широкое применение.

Введение

Международные стандарты облегчают глобальную торговлю, предоставляя общую основу связанных технических требований при совершении сделок. Стандартизация в области чистых помещений внутри организации ISO лежит на техническом комитете 209 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды». В 1992 году Американский национальный институт стандартов (*American National Standards Institute* – ANSI) (член ISO от Соединённых Штатов Америки) предложил формирование технического комитета ISO в соответствии с рекомендациями IEST и передал ответственность за его администрирование IEST. В настоящее время ISO/TC 209 публикует стандарты, входящие в серии ISO 14644 и ISO 14698. Эти стандарты доступны в США через IEST, а по всему миру – через уполномоченных членов ISO.

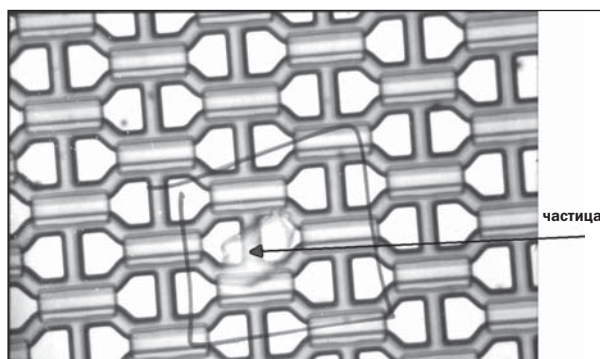
Целью данной статьи является освещение разработанного рабочей группой (*Working Group* – WG) 10 «Нанотехнологии» комитета ISO/TC 209 нового стандарта серии ISO 14644. Стандарт ISO 14644-12 [1] «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 12. Технические требования к мониторингу чистоты воздуха по концентрации наноразмерных частиц» предоставляет рекомендации по мониторингу аэрозольных частиц размером менее 100 нм при

¹ См. «Проект стандарта ISO 14644-12: Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 12: Классификация чистоты воздуха по концентрации наноразмерных частиц (начало)», «Чистые помещения и технологические среды», № 3/2013г.

помощи конденсационного счётчика частиц или аналогичного прибора. Хотя стандартизация в области нанотехнологий подпадает под сферу деятельности комитета ISO/TC 229 “Нанотехнологии”, большая часть продукции, связанная с нанотехнологиями, требует применения чистых помещений.

Первый международный стандарт по чистым помещениям был разработан в 1999 году – ISO 14644-1:1999 “Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха” [2]. Наименьший размер, применяемый в целях классификации, составил 0,1 мкм, однако стандарт также включал секцию по “ультрамелким” частицам размером менее 0,1 мкм. При разработке второй редакции ISO 14644-1 [3] в 2015 году эта секция была изъята и помечена для переноса в другой документ (ISO 14644-12) по нанотехнологии. При этом термин “ультрамелкие” трансформировался в общепринятые сейчас термины “наночастица” и “наноразмерные частицы”. Наночастица определяется размером и сферической формой. Наноразмерная частица – это более общий термин, который может относиться к эквивалентному диаметру, определяемому счётчиком частиц.

Первые редакции стандарта по нанотехнологии расширяли классификационные таблицы для чистых помещений из ISO 14644-1999 на размеры частиц менее 0,1 мкм. Однако возникли опасения, что это потенциально может привести к возникновению нереальных технических усло-



Частица загрязнения на полупроводниковом приборе

вий и вызовет путаницу в промышленности. Предварительные таблицы были удалены, когда стало очевидно, что при текущем понимании наночастиц в чистых помещениях цели ISO 14644-12 ограничены предоставлением рекомендаций по мониторингу, а не классификации чистых помещений. Например, наноразмерные аэрозольные частицы в полупроводниковой промышленности, по-видимому, образуются в чистых помещениях главным образом из-за периодических выбросов от технологического оборудования. В настоящее время открытые источники не содержат данные по другим отраслям промышленности. Мониторинг включает получение тенденций изменения концентрации наноразмерных частиц во времени и разработку целей мониторинга для обнаружения отклонений технологических процессов чистых помещений.

научно-практический журнал

www.cleanrooms.ru

Чистые Помещения и технологические среды

2021

Рекомендации профессионалов
Аналитические обзоры
последних изменений

тел. +7 495 269 0285,
+38 044 228 2764
e-mail: info@vialek.ru

Издательский проект
Группы компаний ВИАЛЕК



История измерения наноразмерных частиц

Измерение наноразмерных частиц относится еще к 1875 году. Французский исследователь Кулье (Coulier) провёл эксперименты с пересыщенным водяными парами воздухом, чтобы имитировать образование облаков, и обнаружил, что частицы в атмосфере способствуют образованию капель, формирующих облака. С течением времени были предложены различные концепции регистрации частиц при помощи пересыщенной среды, включая адиабатическое расширение или конденсацию из непрерывного потока паров. Ранние исследователи называли частицы «ядрами», так как частицы обладали способностью служить в качестве ядер или зон конденсации водяных паров. Современные приборы позволяют обнаруживать частицы независимо от их физико-химических свойств. В настоящее время конденсационные методы счета частиц являются хорошо изученными методами измерения наноразмерных частиц [4]. Одни из первых применений конденса-

ционных счётчиков для чистых помещениях описаны Энсором и Донованом (Ensor, Donovan) [5].

В текущей литературе по чистым помещениям сведения о распределении частиц в наноразмерном диапазоне крайне ограничены. Отсутствие информации связано с очень низкими концентрациями, а также тем, что измерения проводятся для подтверждения соответствия классификации по ISO 14644-1:2015. Энсор и др. [6] сообщили о проведении измерения распределения частиц по размерам в различных чистых помещениях и разных функциональных состояниях.

Сем [7] проанализировал поведение аэрозольных наночастиц в чистых помещениях, основываясь на динамике аэрозолей, рассмотренной Хиндсом [8], и данных, предоставленных компанией Texas Instruments, Inc. Основываясь на хорошо изученном три-модальном распределении атмосферных аэрозолей, Сем предположил, что сходное распределение аэрозольных частиц по размерам будет наблюдаться и для чистых помещений. Подводя итог, поведение аэрозо-

CAT Clean Air Technology

- ✓ **Квалификация**
- ✓ **Валидация**
- ✓ **Консалтинг и планирование**
- ✓ **Ввод в эксплуатацию**
- ✓ **Технический анализ**
- ✓ **Системы мониторинга**



Немецкое качество теперь в России



ООО CAT Clean Air Technology

109029, Москва, ул. Скотопрогонная 29/1
Тел.: +7 926 136 30 12

E-Mail: info@cat-ooo.com
Web: www.cat-ooo.com

CAT Clean Air Technology GmbH

70499, Stuttgart, Motorstrasse 51
Tel.: +49 711 365 91 99-0
Fax: +49 711 365 91 99-99

E-Mail: zentrale@catgmbh.de
Web: www.catgmbh.de

лей в наноразмерном диапазоне определяется процессами конденсации (менее 0,1 мкм); область субмикронных размеров в диапазоне 0,1–1 мкм определяется процессами коагуляции частиц из наноразмерного диапазона или непосредственно промышленными выбросами, а также осаждением более крупных частиц; крупные частицы размером более 1 мкм представлены взвешенной пылью. Главное отличие между внешней атмосферой и чистыми помещениями заключается в том, что концентрация частиц в диапазоне 0,1–1 мкм определяется прохождением атмосферных частиц через фильтры, для которых существует размер частиц с наибольшей проникающей способностью. Наблюдения за наноразмерными частицами в чистых помещениях полупроводниковой промышленности обнаружили резкие скачки их концентрации (*burst* – вспышка). Такие явления были интерпретированы как свидетельство наличия точечных источников частиц или их прекурсоров, генерируемых технологическими инструментами, которые обнаруживаются при прохождении шлейфа частиц через входной патрубок прибора.

Энсор и др. [9] опубликовали результаты измерений в помещении класса 5 ISO в диапазоне размеров 0,05–5 мкм при помощи системы из двух работающих параллельно конденсационных счетчиков с диффузионными батареями на входе и двух оптических счётчиков частиц. Параллельные измерения проводились для усреднения скачков концентрации наноразмерных частиц. Характеристическая кривая для состояния помещения “оснащённое” (ночью) соответствовала предсказанному ранее Энсором и др. [6], т.е. наблюдалось совсем небольшое количество наноразмерных частиц. Однако когда помещение находилось в состоянии “эксплуатируемое” (днём, во время проведения технологических процессов), форма и наклон кривой приближались к распределению, характерному для классов по стандарту ISO 14644-1:1999, благодаря генерации наноразмерных частиц в технологических процессах и персоналом.

Ахонен и др. [10] сообщали о проведении измерений наноразмерных частиц в современном чистом помещении для полупроводниковых технологий с применением высокотехнологичного оборудования, отсекаемый размер частиц для которого составляет около 1 нм. Исследования показали наличие частиц размером менее 2 нм, образующихся путем конденсации паров, выделяемых технологическим оборудованием (нанесение атомных слоёв, напыление оксидов индия и оло-

ва, литография), которые достаточно быстро коагулируют в более крупные частицы. Выделение частиц технологическим оборудованием происходит скачками (вероятно из-за коагулировавших наночастиц), аналогично явлению, описанному Семом годами ранее. Некоторые такие скачки концентрации для процесса нанесения атомных слоёв превысили 105 см^{-3} (10^{11} м^{-3}). Однако между скачками концентрация частиц размером 1,4 нм была относительно мала – менее 10 см^{-3} . В диапазоне размеров 1,1–1,4 нм наблюдалась концентрация частиц на постоянном уровне 200–700 см^{-3} . Исследование показало, что концентрация таких частиц, вероятно, не связана с процессами в чистом помещении и не зависит от времени, а связана с образованием частиц или кластеров под действием излучения, например, космических лучей или естественной радиации [10].

Дополнительным объяснением высокой концентрации частиц в диапазоне размеров 1,1–1,4 нм может быть тепловой отскок (*thermal rebound*) от волокон внутри высокоэффективных фильтров. Вангом и Каспером [11] было высказано предположение, что частицы, размер которых ниже определённого уровня (около 1 нм), имеют достаточную скорость благодаря броуновскому движению, чтобы отскакивать и не садиться на поверхность волокон.

Дживенчи и Тан [12] провели обзор литературных источников, посвящённых тепловому отскоку (около 20 исследователей не смогли обнаружить такого явления), и предложили новую гипотезу, указывающую на относительную влажность как упущенный фактор, позволяющий объяснить получение положительных экспериментальных результатов в некоторых случаях. В недавней статье Дживенчи и др. [13] обнаружили доказательства теплового отскока частиц размером менее 1,17 нм при низкой относительной влажности от волокон тонких полимерных фильтров, полученных электроформованием. Таким образом, всё же существует вероятность теплового отскока в фильтрующих системах в контролируемых определённым образом условиях среды в чистых помещениях.

По мере продвижения нанотехнологий могут быть проведены дополнительные исследования, которые позволят лучше понять поведение наноразмерных частиц в среде чистых помещений. Стандартизованные данные мониторинга, полученные при более широком применении стандарта ISO 14644-12, также могут привести к получению данных, заслуживающих дальнейших исследований.

Место ISO 14644-12 в серии стандартов ISO 14644

Используя рассмотренную ранее концепцию, согласно которой физическое поведение размерных групп аэрозольных частиц в значительной степени различается по источникам частиц и механизму удаления, можно составить сравнительную таблицу (табл. 1).

Целевые пользователи ISO 14644-12

Инженеры-технологи

Стандарт ISO 14644-12 призван поддержать исследования, разработки и производство в области нанотехнологий. Одним из примеров быстро развивающейся области нанотехнологий может быть полупроводниковая промышленность,

Таблица 1

Сравнение стандартов ISO 14644 по диапазону размеров частиц

Стандарт ISO/TC 209 (под заголовком “Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды”)	Диапазон размеров	Физические механизмы поведения частиц	Применение
ISO 14644-8:2013 [14]. Часть 8. Классификация чистоты воздуха по концентрации химических загрязнений. (Примечание: в будущем “классификация” будет отнесена к стандарту ISO 14644-1)	Молекулярная фаза Менее 0,001 мкм (1 нм)	Источники: выделение материалами и осаждённые органические (имеются в виду органические химические соединения) тестовые аэрозоли; атмосферные загрязнения, проникающие через фильтры. Механизмы: конденсирующиеся и реакционно-способные предшественники наночастиц и осаждение на поверхности	Свойства, используемые при проектировании производственных площадей и мониторинг
ISO 14644-12:2011. Часть 12. Технические требования к мониторингу чистоты воздуха по концентрации наноразмерных частиц	Наноуровень 0,001–0,1 мкм (1–100 нм)	Источники: генерация оборудованием, кластеры, образующиеся при коронном разряде или под действием радиации, утечки фильтров, или, возможно, тепловой отскок от волокон фильтров. Механизмы: броуновское движение и коагуляция	Мониторинг
ISO 14644-1:2015. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц	Микроуровень 0,1–5 мкм	Источники: генерация в технологических процессах и персонал, повторный подъём в воздух с поверхностей. Утечки и проскок через фильтры. Механизмы: движение под действием конвекции	Классификация
ISO 14644-2:2015 [15]. Часть 2. Текущий контроль для подтверждения постоянного соответствия чистоты воздуха по концентрации частиц	Микроуровень 0,1–5 мкм	Дополняющий документ к ISO 14644-1	Мониторинг. Требования к программе мониторинга на основании анализа рисков
ISO 14644-17 [16]. Часть 17. Технические требования к мониторингу осаждения частиц (в разработке)	Макроуровень 5 мкм	Источники: повторный подъём в воздух с поверхностей и персонал. Механизмы: движение под действием гравитации, конвекция воздуха	Мониторинг
ISO 14644-14:2016 [17]. Часть 14. Оценка пригодности к использованию оборудования путем определения концентрации взвешенных в воздухе частиц	Используется ISO 14644-1 для определения пригодности оборудования к использованию в помещениях заданного класса чистоты	В будущем принципы ISO 14644-14 могут быть расширены на другие диапазоны размеров частиц, в зависимости от требований конкретных применений, например по 14644-12	Оценка пригодности

учитывая постоянное уменьшение размеров элементов в течение последних десятилетий. Требования к мониторингу в этой отрасли могут относиться и к наноразмерному диапазону. В недавнем докладе [18] было предложено несколько направлений применения мониторинга наноразмерных частиц:

- мониторинг наноразмерных частиц, генерируемых технологическим оборудованием;
- мониторинг чистых помещений и идентификация проблем;
- мониторинг сверхчистых инертных газов (с применением редуктора, понижающего давление);
- обнаружение наноразмерных частиц ниже критического уровня полёта головок в жёстких дисках.

Одной из потенциальных причин мониторинга технологического оборудования является создание независимого индикатора, позволяющего судить, например, о целостности технологических ёмкостей. Кроме того, существует вероятность перекрёстного загрязнения наноразмерными частицами разных процессов, идущих в одном

чистом помещении. Ремиарз [19] описал конденсационный счётчик с низким фоновым уровнем для чистых помещений и низким порогом чувствительности 10 нм, используя концепцию содержащего воду ламинарного потока, предложенную Херингом и др. [20]. Как сообщалось Ахоненом и др., оборудование полупроводникового производства, в частности для химических и термических процессов, может быть более интенсивным источником наноразмерных частиц, чем предполагалось ранее.

Мониторинг и исследования в области промышленной гигиены

Взвешенные наночастицы привлекают все большее внимание как угроза здоровью на производствах, связанных с нанотехнологиями, в том числе и в чистых помещениях. Для измерения используются счётчики частиц, так как традиционные методы отбора пробы на фильтр имеют недостаточную чувствительность и разрешение во времени. Шепард и Бреннер [21] описали применение конденсационного счётчика и других



ФИЛЬТРОВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ МОДУЛЬ ФВМ-1206-ЕСА-В00



Низкий уровень шума 36 дБ*
Малое энергопотребление 60 Вт*

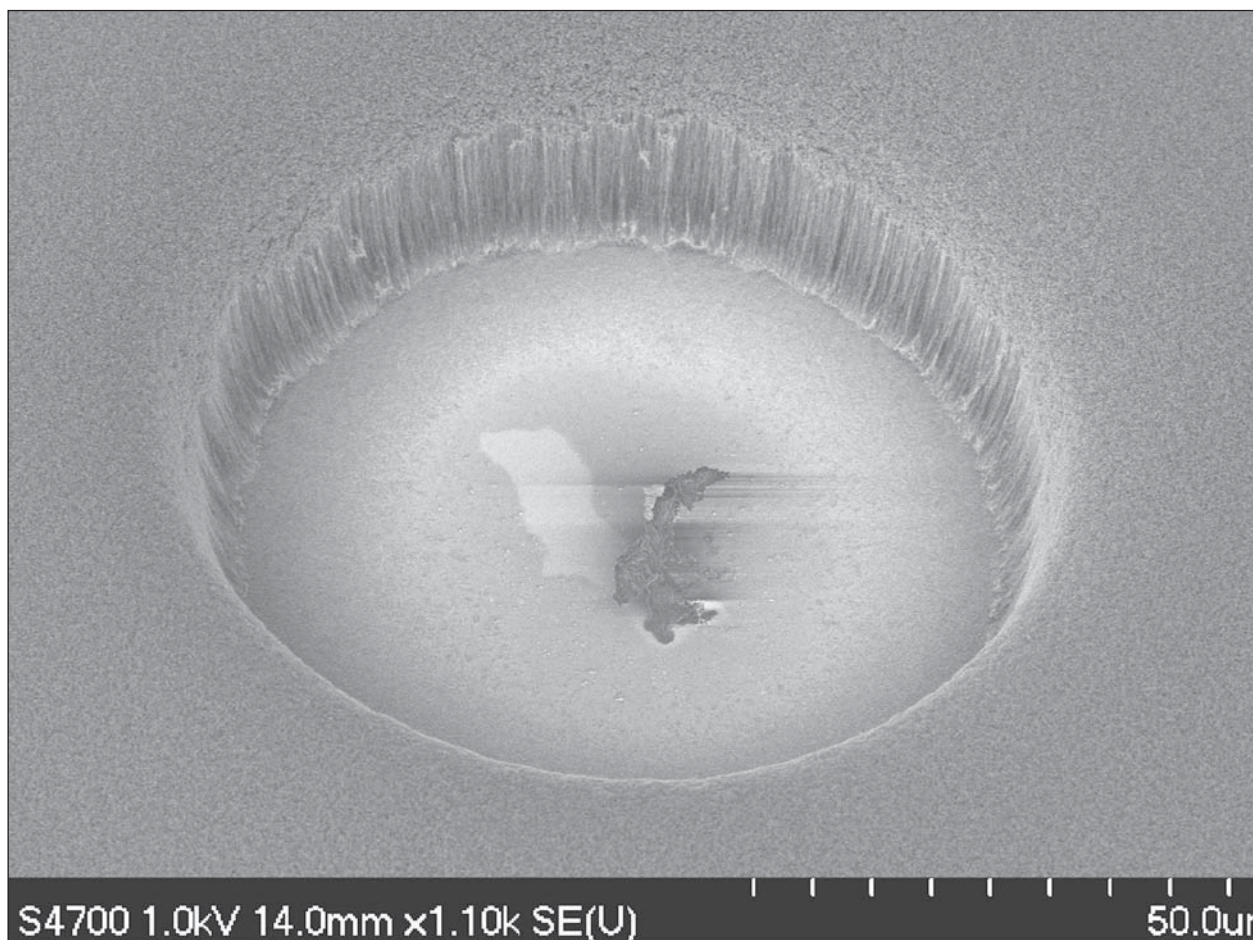
*при скорости потока воздуха в сечении фильтра 0,33 м/с (750 м³/час), измерения шума производились в 1 м от поверхности фильтра

АО „Филтр“

249855, Калужская обл., Дзержинский район,
п. Товарково, Промышленный мкр., д. 1

www.ftov.ru

Тел./факс: (48434) 4-10-10, 4-10-00
e-mail: filtr@ftov.ru



Загрязняющая частица, препятствующая росту углеродных нанотрубок

приборов на участках водной полировки полупроводниковых производств в чистых помещениях. Ахонен и др. рассматривали вопрос вредности выделений от технологического оборудования при проведении производственных процессов, однако не пришли к конкретным выводам.

Другим применением ISO 14644-12 может быть мониторинг наночастиц, образуемых компонентами лекарственных средств в чистых помещениях и изоляторах.

Как сообщалось Даттоном [22]: согласно доктору Стивену Олденбургу (Dr. Steven Oldenburg), «Наночастицы создают возможности». «Не размер выделяет их, а то, как изменение свойств на наноуровне делает их полезными».

Наночастицы используются как активные ингредиенты и носители в ряду новых терапевтических средств на различных стадиях внедрения на рынке. Использование активных ингредиентов с высокой эффективностью (*High-Potency Active Pharmaceutical Ingredients* – HPAPI) увеличивается по мере разработки компаниями более эффективных медикаментов направленного действия. Мониторинг наночастиц HPAPI может быть крити-

чески важным на многих стадиях производства, включая уборку изоляторов после проведения производственных процессов. Некоторые лекарственные средства могут попадать в воздух в виде наночастиц при производстве. В ходе валидации могут быть получены данные, позволяющие определить время восстановления и безопасные границы, когда можно открывать изоляторы и приступать к операциям внутри. ISO 14644-12 может быть полезен при организации мониторинга для таких производств.

Содержание ISO 14644-12

Наиболее эффективным прибором для измерения взвешенных наноразмерных частиц в целях мониторинга является конденсационный счётчик частиц. Методика проведения измерений для мониторинга при помощи конденсационного счётчика приводится в справочном приложении А. Таблица А.1 стандарта содержит пример требований к измерительному оборудованию. Приводится только пример требований, так как указанные параметры прибора – пределы обнаружения и размер частиц – могут измениться по мере

развития представлений о мониторинге наноразмерных частиц для технологических процессов. Метод организации мониторинга чистоты воздуха по концентрации наноразмерных частиц должен включать систематический план, чётко установленную процедуру и способ оценки результатов. Определение уровней тревоги и действия основывается на оценке рисков. При этом стандарт ISO 14644-2 приводится как пример руководства по созданию плана мониторинга. Требования также могут быть утверждены соглашением между заказчиком и исполнителем.

Критерии выбора метода измерения включают:

- размер измеряемых частиц;
- требования по времени отбора пробы и анализа;
- объём пробы;
- точку отбора проб;
- количество проб;
- критичность процесса/продукта;
- разработку/планировку чистой зоны.

Могут применяться альтернативные методы/приборы, имеющие документальное подтверждение функциональности, сходной с конденсационным счётчиком частиц. Если не были оговорены и утверждены альтернативные варианты, должна применяться рекомендуемая стандартом методика.

Важным требованием является размер определяемых наночастиц. Конденсационный счётчик измеряет интегральную концентрацию для размеров частиц более 50 % отсекаемого размера (иногда называемого разрешением прибора). Отклик прибора определяется значением 50 % отсекаемого размера частиц и формой характеристической кривой. Обычно характеристическая кривая имеет S-образную форму. Более подробная информация приводится в Приложении В стандарта ISO 14644-12.

Испытания, проводимые для подтверждения соответствия стандарту, должны проводиться калиброванным оборудованием. При этом протокол измерений должен включать характеристики измерительного оборудования, такие как отсекаемый размер частиц и собственный фон; описание плана измерений; результаты измерений и любую другую информацию, требуемую заказчиком.

Заключение

Стандарт ISO 14644-12 это независимый документ, который содержит требования по наноразмерным частицам. Информация по наноразмерным частицам в чистых помещениях в литературных источниках достаточно ограниче-

на, так как основное внимание обычно уделяется частицам на микроуровне. Основным источником наноразмерных частиц в эксплуатируемом чистом помещении полупроводниковой промышленности является производственное оборудование, часто выделяющие частицы кратковременными всплесками. ISO 14644-12 содержит требования и рекомендации по мониторингу технологических процессов и приборам для проведения измерений наноразмерных частиц в чистых помещениях.

В частности, ISO 14644-12 обеспечивает:

- согласованное применение конденсационных счётчиков и других приборов для измерения наноразмерных частиц;
- потенциал для широкого распространения по мере совершенствования измерительного оборудования;
- пример спецификации прибора, который должен послужить стимулом для начала дальнейшего диалога о требованиях к приборам для использования в чистых помещениях;
- поддержку исторической тенденции к уменьшению размеров характерных элементов в производстве. Нанотехнология является самым наиболее современным появлением этой тенденции. Продукты, производство которых обеспечивается нанотехнологиями, вероятно, будут производиться в чистых помещениях, возможно, в реакторах или технологических процессах.

Технический комитет ISO/TC 209

Применение чистых помещений и связанных с ними контролируемых сред становится все более распространенным явлением, и становится ключевой технологией для производства. В ответ рабочие группы комитета ISO/TC 209 представили стандарты для проектирования, испытаний и эксплуатации чистых помещений и связанных с ними контролируемых сред, чтобы помочь с внедрением этой полезной технологии различными группами пользователей и регионами.

В настоящее время в данном комитете принимают участие 24 страны-члена, которые имеют право назначать экспертов для рабочих групп, и голосовать за разрабатываемые или пересматриваемые стандарты. Кроме того, еще 21 страна может выступать в качестве наблюдателей за работой комитета ISO/TC 209.

Стандарты ISO/TC 209 написаны в общих чертах в том смысле, что они могут применяться для испытаний и мониторинга, или в более широком смысле для контроля чистоты в различных отраслях промышленности, таких как:

- автомобильная;
- аэрокосмическая;
- производство электроники;
- полупроводниковая;
- пищевая;
- наука о здоровье (фармацевтика, здравоохранение, больницы);
- научные исследования.

Кроме того, для обеспечения отклоняющихся или более конкретных требований и аспектов иногда используются отраслевые или национальные стандарты и руководящие документы.

Комитет ISO/TC 209 установил официальные связи с пятью другими ISO/TC и Международной конфедерацией обществ по контролю микрозагрязнений (*Confederation of Contamination Control Societies* – ICCCS), чтобы обеспечить прозрачность и последовательность в своих усилиях по стандартизации. В 2017 году ISO/TC 209 пересмотрел бизнес-план и сферу применения, чтобы отразить и удовлетворить текущие и будущие потребности в стандартизации потребителей, нормативных органов и промышленности в отношении чистых помещений. Пересмотренная сфера применения отражает технический прогресс и признание того, что технологии чистых помещений стали более широко применяться в различных отраслях промышленности, а области применения стали более разнообразными.

Список используемой литературы

1. ISO 14644-12:2018, Cleanrooms and associated controlled environments — Part 12: Specifications for monitoring air cleanliness by nanoscale particle concentration.
2. ISO 14644-1:1999, Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration.
3. ISO 14644-1:2015, Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration.
4. Mohnen, V. A. and G. M. Hidy. Ensor D. S., ed. 2011. Atmospheric Nanoparticles: Early Metrology and Observations (1875–1980). *Aerosol Science and Technology: History and Reviews* 411. RTI Press Book series, RTI International, 3040 Cornwallis Road, Research Triangle Park, NC.
5. Ensor, D.S. and R.P. Donovan. 1985. The Application of Condensation Nuclei Monitors to Clean Rooms, *Journal of the IEST* 28: 34–36.
6. Ensor D.S., R.P. Donovan, and B.R. Locke. 1987. Particle Size Distributions in Clean Rooms. *Journal of the IEST* 30 (6): 44–49.
7. Sem, G.J. Donovan, R.P., ed. 1990. Ultrafine (<0.1 µm Diameter) Particles. In: *Particle control for Semiconductor Manufacturing* 79–103. Marcel Dekker, Inc., New York. SBN 9780824782429 – CAT# DK4199.
8. Hinds, W.C. 1982. *Aerosol Technology*. John Wiley and Sons, New York.
9. Ensor D.S., A.S. Viner, E.W. Johnson, R.P. Donovan, P.B. Keady, and K.J. Weyrauch. 1989. Measurement of Ultrafine Aerosol Particle Size Distributions at Low Concentrations by Parallel Arrays of a Diffusion Battery and a Condensation Nucleus Counter in Series. *Journal of Aerosol Science* 20: 471–475.
10. Ahonen, L.R., J. Kangasluoma, J. Lammi, K. Lehtipalo, K. Hämeri, T. Petäjä, and M. Kulmala. 2017. First Measurements of the Number Size Distribution of 1-2 nm Aerosol Particles Released from Manufacturing Processes in a Cleanroom Environment. *Aerosol Science and Technology* 51: 685693. DOI: 10.1080/02786826.2017.1292347.
11. Wang, H.C. and G. Kasper. 1991. Filtration Efficiency of Nanometer-Size Aerosol Particles. *Journal of Aerosol Science* 22(1): 31–41.
12. Givehchi, R. and Tan, Z. 2015. The effect of capillary force on airborne nanoparticle filtration, *Journal of Aerosol Science*, 83, May 2015, Pages 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.02.001>.
13. Givehchi, R., Li, Q., and Tan, Z. 2018. Filtration of sub-3.3 nm tungsten oxide particles using nanofibrous filters, *Materials*, 11(8), 1277; doi:10.3390/ma11081277.
14. ISO 14644-8:2013, Cleanrooms and associated controlled environments—Part 8: Classification of air cleanliness by chemical concentration (ACC).
15. ISO 14644-2:2015, Cleanrooms and associated controlled environments—Part 2: Monitoring to provide evidence of cleanroom performance related to air cleanliness by particle concentration.
16. ISO/PWI 14644-17, Specification of requirements for particle deposition monitoring. (Under development).
17. ISO 14644-14:2016, Cleanrooms and associated controlled environments—Part 14: Assessment of suitability for use of equipment by airborne particle concentration.
18. Anonymous. 2014. Nanoparticle counter applications in advances processes. *Symposium on Technical Standards for the Measurement of Nano-particulate matter*. Particle Measuring Systems, Inc. <http://www.semi.org/zh/sites/semi.org/files/docs/NanoparticleCounter>.
19. Remiarz, R. 2017. Measurement of Airborne Nanoscale Particles Using Condensation Particle Counters. Semicon Europa November 14-17, 2017, Munich, Germany. http://www.semi.org/eu/sites/semi.org/files/events/presentations/O3_Richard%20Remiarz_TSI_0.pdf.
20. Hering, S. V., M.R. Stolzenburg, F.R. Quant, D.R. Oberreit, and P.B. Keady. 2005. A Laminar-Flow, Water-Based Condensation Particle Counter (WCPC). *Aerosol Science and Technology* 39 (7): 659-672. DOI: 10.1080/02786820500182123.
21. Shepard, M. N. and S. Brenner. 2014. An Occupational Exposure Assessment for Engineered Nanoparticles Used in Semiconductor Fabrication. *Annals of Occupational Hygiene* 58 (2): 251–265. DOI:10.1093/annhyg/met064.
22. Dutton, G. 2018. Nanoparticles for Multiple Applications, GEN October 15, 2018.
23. Avraam, M. HPAPI Technology Trends, *Contract Pharma* October 2018. ■