

ГЛАВА 6

ВЫБРОСЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Авторы

Скот Баргос (США)

Лаура С. Бью (США), С. Шепард Бартон (США), Чарльз Л. Фрауст (США), Франциска Иллузи (Италия), Майкл Т. Моселла (США) и Себастьян Ру (Франция/США)

Сотрудничающие авторы

Гвидо Агостинелли (Италия), Эрик Алсема (Нидерланды), Сенг-Ки Чи (Республика Корея), Василис М. Фтенакис (США), Джозеф Ван Гомпел (США), Хидеки Нишида (Япония), Такаюки Огоши (Япония) и Курт Т. Вернер (США).

Содержание

6	Выбросы электронной промышленности	6.5
6.1	Введение	6.5
6.2	Вопросы методологии	6.6
6.2.1	Выбор метода	6.6
6.2.1.1	Травление и чистка ХОПФ для полупроводников, жидкокристаллических дисплеев и фотоэлектрических элементов	6.6
6.2.1.2	Теплоносители	6.14
6.2.2	Выбор коэффициентов выбросов	6.16
6.2.2.1	Травление и чистка ХОПФ для полупроводников, жидкокристаллических дисплеев и фотоэлектрических элементов	6.16
6.2.2.2	Жидкие теплоносители	6.23
6.2.3	Выбор данных о деятельности	6.23
6.2.4	Полнота	6.26
6.2.5	Разработка согласованного временного ряда	6.27
6.3	Оценка неопределённостей	6.27
6.3.1	Неопределённости коэффициентов выбросов	6.28
6.3.2	Неопределённости данных о деятельности	6.28
6.4	Обеспечение качества/контроль качества (ОК/КК), отчётность и документация	6.31
6.4.1	Обеспечение качества/контроль качества (ОК/КК)	6.31
6.4.2	Отчетность и документация	6.31
	Ссылки	6.33

Уравнения

Уравнение 6.1	Метод уровня 1 для оценки множества выбросов ФС	6.9
Уравнение 6.2	Метод уровня 2а для оценки выбросов ФС	6.10
Уравнение 6.3	Выбросы побочного продукта CF_4	6.10
Уравнение 6.4	Выбросы побочного продукта C_2F_6	6.10
Уравнение 6.5	Выбросы побочного продукта CHF_3	6.11
Уравнение 6.6	Выбросы побочного продукта C_3F_8	6.11
Уравнение 6.7	Метод уровня 2b для оценки выбросов ФС	6.12
Уравнение 6.8	Выбросы побочного продукта CF_4	6.12
Уравнение 6.9	Выбросы побочного продукта C_2F_6	6.12
Уравнение 6.10	Выбросы побочного продукта CHF_3	6.13
Уравнение 6.11	Выбросы побочного продукта C_3F_8	6.13

Уравнение 6.12 Метод уровня 1 для оценки общих выбросов ФС от теплоносителей.....	6.14
Уравнение 6.13 Метод уровня 2 для оценки выбросов ФС от теплоносителей.....	6.16

Рисунки

Рисунок 6.1 Схема принятия решений по оценке выбросов ФС от электронной промышленности.....	6.7
Рисунок 6.2 Схема принятия решений по оценке выбросов ФС от утечек теплоносителей в электронной промышленности.....	6.15

Таблицы

Таблица 6.1 Исходные данные необходимые для расчета выбросов различных уровней для электронной промышленности.....	6.8
Таблица 6.2 Коэффициенты уровня 1 для выбросов отдельных газов от электронной промышленности.....	6.17
Таблица 6.3 Коэффициенты выбросов уровня 2, принятые по умолчанию для выбросов от производства полупроводников.....	6.18
Таблица 6.4 Коэффициенты выбросов уровня 2, принятые по умолчанию для выбросов ФС от производства LCD.....	6.19
Таблица 6.5 Коэффициенты выбросов уровня 2, принятые по умолчанию для выбросов ФС от производства ФЭЭ.....	6.20
Таблица 6.6 Коэффициенты эффективности очистки уровня 2А и 2В принятые по умолчанию для технологий ^{А,В,Е} снижения выбросов ФС, применяемых в электронной промышленности.....	6.21
Таблица 6.7 Суммарные проектные мощности стран в 2003, 2004 и 2005 году, выраженные в Мм ² кремния (Si) и стекла.....	6.25
Таблица 6.8 Суммарное производство ФЭЭ в странах ^а в 2003 году, Мм ²	6.26
Таблица 6.9 Оценки по умолчанию относительных ошибок (%) для коэффициента выбросов ФС уровня 2 от производства полупроводников, доверительный интервал 95%.....	6.29
Таблица 6.10 Оценки по умолчанию относительных ошибок (%) для коэффициента выбросов ФС уровня 2 от производства LCD, доверительный интервал 95%.....	6.30
Таблица 6.11 Информация необходимая для обеспечения полной прозрачности оценок выбросов от электронной промышленности.....	6.32

Блок

Блок 6.1 Пример для производства полупроводников.....	6.14
---	------

6 ВЫБРОСЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

6.1 ВВЕДЕНИЕ

Фторированные (ФС) соединения используются во многих процессах современной электронной промышленности для плазменного травления сложных схем, чистки реакционных камер и температурного контроля. Отдельные сектора электронной промышленности, рассмотренные в этой главе, включают производство плоскочелюстных дисплеев на тонкопленочных транзисторах (ТПТ-ППД) и фотоэлектрические элементы (ФЭЭ) (всё это относится к электронной промышленности).¹ В настоящее время электронная промышленность выбрасывает в атмосферу два ФС, которые при комнатной температуре являются газами, и ФС, которые при комнатной температуре являются жидкостями. Эти газы включают CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , $\text{ц-}C_4F_8$, $\text{ц-}C_4F_8O$, C_4F_6 , C_5F_8 , CHF_3 , CH_2F_2 , трифторид азота (NF_3), и гексафторид серы (SF_6) и применяются в двух важных стадиях электронного производства: (i) плазменное травление кремнийсодержащих материалов и (ii) чистка стенок камеры химического осаждения из паровой фазы (ХОПФ), в которой осаждали кремний.² Большая часть выбросов ФС происходит вследствие недостаточной эффективности расходования (потребления) прекурсоров ФС в процессе травления или чистки. Кроме того, часть фторированных соединений, используемых в процессе производства, может превратиться в побочный продукт CF_4 и в некоторых случаях в C_2F_6 , CHF_3 и C_3F_8 .³ Следует также учитывать образование CF_4 в качестве побочного продукта травления или чистки углеродсодержащих материалов с низкой диэлектрической постоянной (с низким k) (или карбида).⁴ Кроме того, ожидается рост применения F_2 , COF_2 , и ClF_3 . Эти газы сами по себе не вносят вклад в глобальное потепление, но в некоторых условиях могут приводить к образованию CF_4 . Производители электроники используют ФС для температурного контроля некоторых процессов. Эти ФС также известны как теплоносители, они являются жидкостями при комнатной температуре и имеют значительное давление паров. Потери в результате испарения вносят вклад в общие выбросы ФС. Потери от испарения происходят при охлаждении некоторых видов технологического оборудования, во время тестирования упакованных полупроводниковых устройств и при монтаже плат в процессе пайки электронных компонентов с оплавлением в паровой фазе. Потери от испарения отсутствуют, если ФС используются для охлаждения электронных компонентов или систем во время работы. В этом случае жидкие ФС находятся в закрытых системах в течение всего срока эксплуатации продукта или системы. На рынке электронного сектора представлено более 20 различных жидких ФС, часто в виде смесей с полностью фторированными соединениями.⁵ Поскольку CO_2 -эквиваленты этих жидкостей разные, то их

¹ Недавние всесторонние исследования показали, что 40-50% производителей ФЭЭ в США и Европе используют относительно небольшие количества ФС (в основном CF_4 в процессе травления плат из кристаллического кремния и C_2F_6 в процессе чистки камер после осаждения $SiNx$ плёнок). Согласно этим исследованиям мировое потребление CF_4 в 2004 году составило около 30 Мтонн. Кроме того, в некоторых публикациях отмечаются преимущества использования ФС для повышения производительности и снижения стоимости силиконовых технологий (Shah *et al.*, 2004; Maucocock, 2005; Agostinelli *et al.*, 2004 и Rentsch *et al.*, 2005). Такой прогноз роста и перспектив применения ФС послужил основанием для включения выбросов ФС от производства ПСЭ в эту главу.

² Несмотря на то, что в настоящее время МГЭИК еще не утвердил потенциал глобального потепления (ПГП) для C_5F_8 , выбросы C_5F_8 обсуждаются в этой главе. C_5F_8 относится к прямым парниковым газам и его выбросы можно оценить с помощью методов и данных, описанных в этой главе. Время жизни C_5F_8 в атмосфере – около 1 года, что даёт относительно низкий ПГП (Sekiya, 2003).

³ Выбросы побочного продукта C_2F_6 наблюдались при разложении молекул C_4F_6 и могут происходить с другими ФС с числом атомов углерода более одного. Обратите внимание, что для большинства прекурсоров ФС образование C_2F_6 в качестве побочного продукта не наблюдается. Образование CHF_3 было обнаружено при использовании $\text{ц-}C_4F_8$ в качестве травильного агента при производстве ТПТ-ППД и образование побочного продукта C_3F_8 – при использовании C_4F_8O для чистки камер.

⁴ Материалы с низкой диэлектрической постоянной (с низким k) сначала использовались в качестве изоляторов для коммутационной системы полупроводниковых чипов на узле 0,25 мкм и ниже. Многие материалы с низким k содержат углерод, который можно удалить в виде CF_4 в процессе травления тонких плёнок или чистки реакторов ХОПФ, используемых для осаждения веществ с низким k. CF_4 может также образоваться во время чистки реакторов ХОПФ, используемых для осаждения карбида.

⁵ Относительно недавно был опубликован обзор, который, среди прочих вопросов, был посвящён использованию жидких ФС (теплоносителей), их составу и ПГП. См. Burton (2004a).

приходится отслеживать и учитывать по отдельности. Точные масштабы такого превращения будут определены в специальных требованиях к составлению отчётности.^{6,7} Кроме того, жидкие ФС иногда используют для чистки ТПТ-ППД в процессе производства.

6.2 ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ

6.2.1 Выбор метода

6.2.1.1 ТРАВЛЕНИЕ И ЧИСТКА ХОПФ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ, ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Выбросы меняются в зависимости от газов, применяемых при производстве различных типов электронных устройств, от технологии производства (или более широко – от типа процесса, например, ХОПФ или травление), от изготовителя оборудования для проведения процесса и от применения технологии снижения выбросов.

Выбор методов зависит от наличия данных и схематически изображён на рисунке 6.1 (Схема принятия решений по оценке выбросов ФС от электронной промышленности). Выбросы от жидких ФС оценивают с помощью методов уровня 1, 2 и 3; эти методы рассматриваются в этом разделе отдельно.⁸

Проведение постоянного (in-situ) мониторинга выбросов в промышленности в настоящее время считается нецелесообразным с технической и экономической точки зрения. Тем не менее, выбросы ФС периодически измеряют в процессе разработки новых процессов и аппаратов, а также после установления наиболее эффективных условий производства (которые также называются условиями осевого процесса).⁹ Перед тем как приступить к массовому выпуску, производители добиваются такого осевого процесса, который минимизирует выбросы ФС. Следует отметить, однако, что выбросы ФС зависят от параметров процесса (например от давления, температуры, мощности плазмы, расхода газа ФС, времени проведения процесса). Поэтому точность методов оценки выбросов будет зависеть от возможных различий между используемой технологией производства и стандартным осевым процессом. Кроме того, эффективность оборудования по снижению выбросов ФС зависит от работы и технического обслуживания оборудования в соответствии со спецификациями производителя: повышение расхода газа, неправильные температурные установки и плохое техническое обслуживание – всё это вместе и по отдельности снижает эффективность работы.

Точность оценки выбросов зависит от выбора метода. В методе уровня 1 для всех параметров используются значения по умолчанию и не учитывается применение технологии снижения выбросов. В методе уровня 2а используются данные компаний о соотношении количеств газа, израсходованных в процессе с применением и без применения технологии очистки выбросов, но без разделения на травление и чистку; для остальных параметров используются значения по умолчанию. В методе уровня

⁶ Эти материалы продаются под названиями Fluorinert™ и Galden®. Материалы Fluorinert™ представляют собой специально подобранные, полностью фторированные алканы, эфиры, третичные амины, аминоэфиры и их смеси, обладающие особыми свойствами. Жидкие продукты Galden® включают линейку полностью фторированных полиэфиров, имеющих общее название «перфторполиэфиры», которые также характеризуются ценными свойствами.

⁷ Если используется готовая смесь, то составителям кадастра необходимо убедиться в том, что были применены правильные коэффициенты перевода массы смеси в массу CO₂.

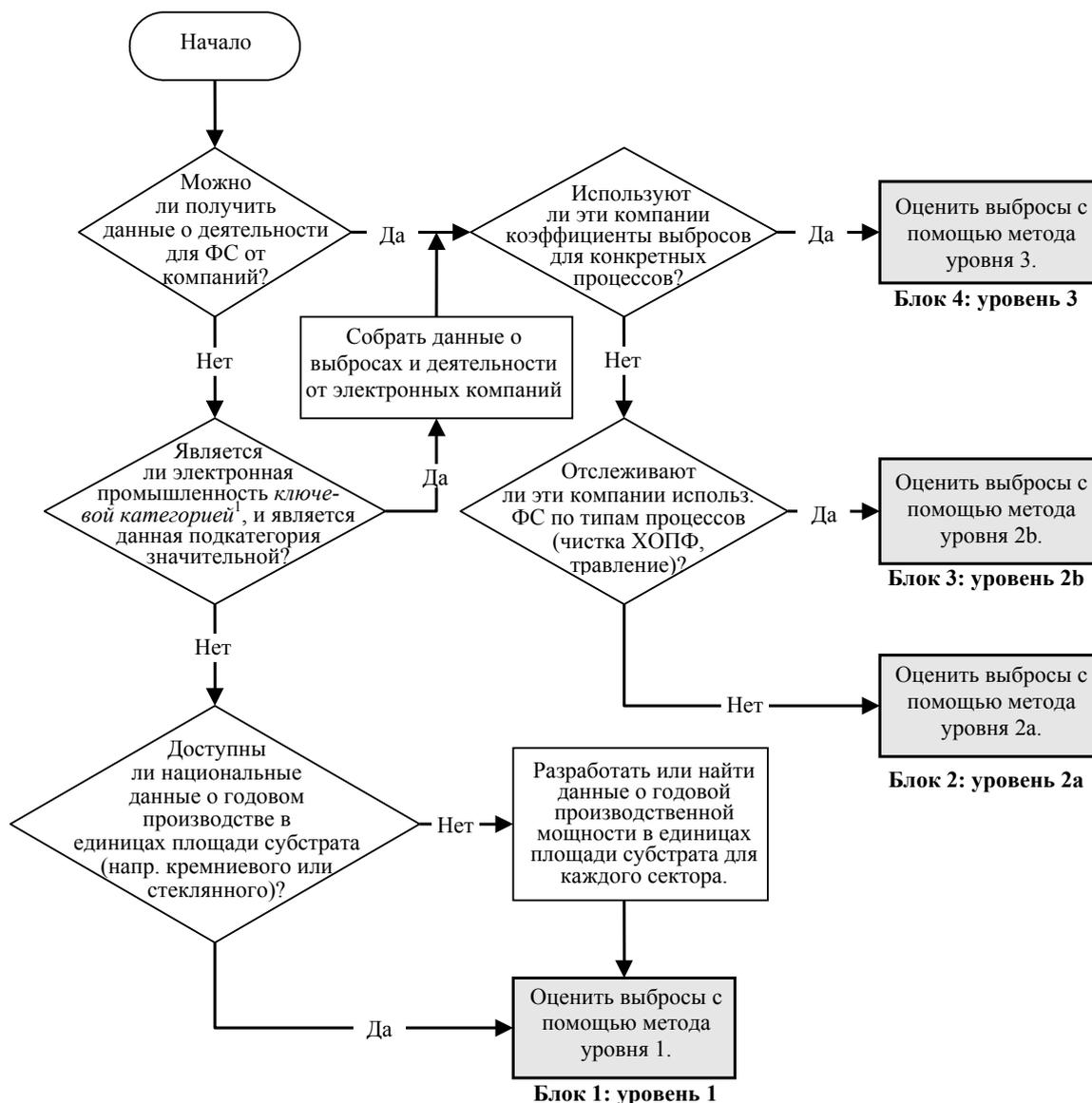
⁸ Логика принятия решений, представленная на рисунке 6.1, не отражает возможности комбинирования уровней с целью повышения качества оценки выбросов. Например, более точные оценки выбросов можно получить, используя уровень 3 для одного газа и процесса и уровень 2b для других газов и процессов, вместо использования только уровня 2b. Аналогично, методы уровня 2а и 2b можно комбинировать, получая более точные оценки по сравнению с применением только уровня 2а. Однако метод уровня 1 не следует комбинировать с другими методами.

⁹ Условия осевого процесса – это условия, при которых производители оборудования стандартизируют оборудование, выпускаемое на рынок. Это номинальные значения для газовых потоков, давления в камере, мощности плазмы и т.д. Для производителей полупроводниковых устройств обычной практикой является модифицирование этих условий с целью оптимизации под конкретные требования.

2b используются данные компаний о соотношении количества газа, израсходованных для *травления* и для *чистки*, а также о соотношении количества газа, израсходованных в процессах с применением и без применения технологии очистки выбросов; при этом используются значения по умолчанию либо для некоторых других параметров, либо для всех остальных параметров. Самый строгий метод – метод уровня 3 – требует знания всех параметров процесса и не использует значения по умолчанию.

В таблице 6.1 представлены требования к исходным данным для расчетов различных уровней для электронной промышленности.

Рисунок 6.1 Схема принятия решений по оценке выбросов ФС от электронной промышленности



Примечания:

1. О *ключевых категориях* и об использовании схемы принятия решений см. главу 4 тома 1 (Методологический выбор и определение ключевых категорий) (комментарий в разделе 4.1.2 об ограниченных источниках).

ТАБЛИЦА 6.1
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ В ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

	Данные	Уровень 1	Уровень 2а	Уровень 2б	Уровень 3
Технологический газ, вводимый в аппарат	$FC_{i,p}$ = кг газа i , вводимого в процесс p или в небольшую систему обычных средств обработки (например, для травления нитрида кремния).				М
	$FC_{i,p}$ = кг газа i , вводимого в процесс крупной категории (например, травление или чистка камеры ХОПФ).		М	М (травл.) и М (ХОПФ)	
	h = часть газа, остающаяся в транспортном контейнере после использования.		Д	Д	М
Реакции и разрушение технологического газа в аппарате	$U_{i,p}$ = коэффициент использования (часть, разрушенная или преобразованная) для травильного газа i и процесса p .		Д	Д (травл.) и Д (ХОПФ) ^a	М
	$V_{CF_4,i,p}$, $V_{C_2F_6,i,p}$, $V_{CHF_3,i,p}$ и $V_{C_3F_8,i,p}$ = коэффициент выбросов для побочных продуктов CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 и C_3F_8 , соответственно, для газа i , для процесса травления.		Д	Д (травл.) и Д (ХОПФ) ^a	М
Последующая очистка выбросов ФС	$a_{i,p}$ = объёмная часть газа i , введённого в процессы с сертифицированной технологией очистки выбросов ФС.		М	М	М
	$d_{i,p}$ = часть газа i , разрушенная с помощью технологии очистки выбросов.		Д	Д ^a	М
	$d_{CF_4,p}$, $d_{C_2F_6,p}$, $d_{CHF_3,p}$ и $d_{C_3F_8,p}$ = часть побочных продуктов CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 и C_3F_8 , соответственно, разрушенных с помощью технологии очистки выбросов. ^b				М
Годовая производственная мощность	C_d = годовая проектная мощность, выраженная в единицах площади поверхности обработанных подложек (кремний, стекло и т.д.).	М			
	C_u = коэффициент использования годовой производственной мощности	Д/М			
<p>М = эти данные следует измерить или получить. Д = следует использовать коэффициенты по умолчанию из руководства. ^a Если возможно и приемлемо, то значения М можно заменить на значения Д для уровня 2а и 2б. См. условия в таблице 6.6. ^b Для уровней 2а и 2б нет значений по умолчанию, поскольку влияние побочных продуктов включено в Д-значения для $d_{i,p}$ для газа i.</p>					

МЕТОД УРОВНЯ 1 - ПО УМОЛЧАНИЮ

Метод уровня 1 – наименее точный метод оценки; его следует применять только в тех случаях, когда нет данных на уровне завода. В отличие от методов уровня 2 или 3, метод уровня 1 предназначен для получения сгруппированной оценки выбросов ФС, при этом выбросы различных газов учитываются отдельно. Расчеты делаются одновременно для всех газов, перечисленных в таблице 6.2, и их можно применять, только если все они отражены в отчёте в полном комплекте.

Расчёт выбросов основан на фиксированном множестве типовых коэффициентов выбросов. Элементы множества различаются в зависимости от сектора (или класса) выпускаемой электронной продукции (полупроводники, ТПТ-ППД или ФЭЭ). Каждый элемент множества (который представляет собой коэффициент выбросов для конкретного газа) выражает средние выбросы на единицу площади подложки (например, кремния, панели ТПТ-ППД или ФЭЭ), потреблённой при производстве. Для всех классов электронных продуктов эти коэффициенты (элементы множества) умножают на годовой коэффициент использования мощностей (C_u , дробь) и годовую проектную мощность (C_d , в квадратных гигаметрах (Gm^2) обработанных подложек). Произведение ($C_u \cdot C_d$) равно площади подложек, потребленных в электронном производстве. Результат представляет собой множество годовых выбросов газов (выраженных в кг), характерное для каждого класса электронных продуктов. Поскольку использование ФС при производстве ФЭЭ меняется в широких пределах, то для оценки выбросов ФС от производства ФЭЭ необходим третий коэффициент для учёта той доли производства ФЭЭ, в которой применяется ФС. Формулу метода уровня 1 описывает уравнение 6.1.

УРАВНЕНИЕ 6.1
МЕТОД УРОВНЯ 1 для ОЦЕНКИ МНОЖЕСТВА ВЫБРОСОВ ФС

$$\{FC_i\}_n = \{EF_i \cdot C_u \cdot C_d \cdot [C_{PV} \cdot \delta + (1 - \delta)]\}_n \quad (i = 1, \dots, n)$$

Где

$\{FC_i\}_n$ = выбросы газа ФС i , масса газа i

Примечание: $\{ \}_n$ означает множество для каждого класса продуктов (полупроводники, ТПТ-ППД или ФЭЭ), и n означает число газов, включённых в каждое множество (шесть для производства полупроводников, три для ТПТ-ППД и два для ФЭЭ элементов. См. таблицу 6.2.). Оценки считаются достоверными, только если они были сделаны и отображены в отчёте с помощью метода уровня 1 для всех элементов множества.

EF_i = коэффициент выбросов ФС для газа i , равный массе выбросов в год на площадь поверхности подложек для данного класса продуктов (масса газа i)/ m^2

C_u = коэффициент использования годовой мощности завода, дробь

C_d = годовая проектная производственная мощность, Gm^2 обработанных подложек (Mm^2 только для производства ФЭЭ)

$C_{ФЭЭ}$ = доля производства ФЭЭ с использованием ФС, дробь

$\delta = 1$, если применяется уравнение 6.1 к производству ФЭЭ, и 0, если применяется уравнение 6.1 к производству полупроводников или ТПТ-ППД, в относительных единицах

Этот метод не учитывает разницу между типами процессов (травление или чистка) и конкретными процессами или аппаратами. Он также не учитывает возможное применение оборудования для очистки газовых выбросов в атмосферу.

При использовании уровня 1 ни в коем случае не следует менять множество ФС, представленное в таблице 6.2. Не следует сочетать оценки выбросов, рассчитанные по методу уровня 1 с оценками выбросов по методам уровня 2 и 3. Составители кадастра также не должны использовать, к примеру, коэффициент уровня 1 для CF_4 для оценки выбросов CF_4 от полупроводников и комбинировать его с результатами расчётов для других ФС газов по методу уровня 2 или 3. (См. также раздел 6.2.2.1.)

МЕТОД УРОВНЯ 2а – ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ КОНКРЕТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГАЗА

Этот метод рассчитывает выбросы для каждого типа ФС на основании данных отдельных компаний о потреблении газа и о технологиях очистки выбросов. В этом методе используются общепромышленные значения по умолчанию для той доли закупаемого газа, которая остаётся в транспортном контейнере после использования (h), для доли израсходованного газа (разложившегося или химически превращённого) в процессе производства полупроводников или ТПТ-ППД, и для доли газа, превратившегося в CF_4 или C_2F_6 в процессе производства. Для применения метода уровня 2а составители кадастра должны напрямую запрашивать информацию (например, годовые отчёты о выбросах) в промышленных ведомствах с тем, чтобы собрать данные и убедиться в том, что технологии очистки выбросов установлены и используются.

Суммарные выбросы равны сумме выбросов ФС газа i , используемого в процессе производства, плюс выбросы от побочных продуктов CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 и C_3F_8 , образовавшихся из газа i , как показано в

уравнении 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 и 6.6. В отличие от методов уровня 3 и 2b, которые будут рассмотрены в этой главе позже, метод уровня 2a не делает различий между процессами или типами процессов (травление или чистка), отдельными процессами или аппаратами. Коэффициент выбросов по умолчанию представляет собой средневзвешенные значения (на основании экспертной оценки весов), сформированные для каждого газа отдельно, для *всех* процессов травления и ХОПФ.

Далее в разделе, посвящённом коэффициентам выбросов, отмечается, что в методе уровня 2a используется коэффициент выбросов для типа процесса (ХОПФ или травление), в котором конкретный ФС представляет собой наиболее часто используемый ФС в данном секторе электронной промышленности. Этот метод отражает современную тенденцию, когда в каждом отдельном типе процесса (ХОПФ или травление) используют свой ФС в каждой отрасли. Однако, в странах, где компании или заводы используют нетрадиционные для отрасли материалы (например, для ХОПФ используют тот газ, который другие производители применяют в основном для травления), то составители кадастра должны оценить вероятность внесения ошибки при использовании метода уровня 2a вместо метода уровня 2b.

$$\begin{aligned} & \text{УРАВНЕНИЕ 6.2} \\ & \text{МЕТОД УРОВНЯ 2a ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ФС} \\ & E_i = (1-h) \cdot FC_i \cdot (1-U_i) \cdot (1-a_i \cdot d_i) \end{aligned}$$

Где

E_i = выбросы газа i , кг

FC_i = потребление газа i , (например, CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , $\text{п-}C_4F_8$, $\text{п-}C_4F_8O$, C_4F_6 , C_5F_8 , CHF_3 , CH_2F_2 , NF_3 , SF_6), кг

h = часть газа, остающаяся в транспортном контейнере после использования, дробь

U_i = рабочий расход газа i (доля разложившегося или химически превращённого газа), дробь

a_i = объёмная доля газа i , израсходованного в процессах с применением технологий очистки выбросов (для компании или завода), дробь

d_i = доля газа i , разрушенного с помощью технологии очистки выбросов, дробь

$$\begin{aligned} & \text{УРАВНЕНИЕ 6.3} \\ & \text{ВЫБРОСЫ ПОБОЧНОГО ПРОДУКТА } CF_4 \\ & BPE_{CF_4,i} = (1-h) \cdot B_{CF_4,i} \cdot FC_i \cdot (1-a_i \cdot d_{CF_4}) \end{aligned}$$

Где

$BPE_{CF_4,i}$ = выбросы побочного продукта CF_4 от израсходованного газа i , кг

$B_{CF_4,i}$ = коэффициент выбросов, кг образовавшегося CF_4 /кг израсходованного газа i

d_{CF_4} = доля побочного продукта CF_4 , разрушенного с помощью технологии очистки выбросов, дробь

$$\begin{aligned} & \text{УРАВНЕНИЕ 6.4} \\ & \text{ВЫБРОСЫ ПОБОЧНОГО ПРОДУКТА } C_2F_6 \\ & BPE_{C_2F_6,i} = (1-h) \cdot B_{C_2F_6,i} \cdot FC_i \cdot (1-a_i \cdot d_{C_2F_6}) \end{aligned}$$

Где

$BPE_{C_2F_6,i}$ = выбросы побочного продукта C_2F_6 от израсходованного газа i , кг

$B_{C_2F_6,i}$ = коэффициент выбросов, кг образовавшегося C_2F_6 /кг израсходованного газа i

$d_{C_2F_6}$ = доля побочного продукта C_2F_6 , разрушенного с помощью технологии очистки выбросов, дробь

УРАВНЕНИЕ 6.5**ВЫБРОСЫ ПОБОЧНОГО ПРОДУКТА CHF_3**

$$VPE_{\text{CHF}_3,i} = (1-h) \cdot B_{\text{CHF}_3,i} \cdot FC_i \cdot (1-a_i \cdot d_{\text{CHF}_3})$$

Где

$VPE_{\text{CHF}_3,i}$ = выбросы побочного продукта CHF_3 от израсходованного газа i , кг

$B_{\text{CHF}_3,i}$ = коэффициент выбросов, кг образовавшегося CHF_3 /кг израсходованного газа i

d_{CHF_3} = доля побочного продукта CHF_3 , разрушенного с помощью технологии очистки выбросов, дробь

УРАВНЕНИЕ 6.6**ВЫБРОСЫ ПОБОЧНОГО ПРОДУКТА C_3F_8**

$$VPE_{\text{C}_3\text{F}_8,i} = (1-h) \cdot B_{\text{C}_3\text{F}_8,i} \cdot FC_i \cdot (1-a_i \cdot d_{\text{C}_3\text{F}_8})$$

Где

$VPE_{\text{C}_3\text{F}_8,i}$ = выбросы побочного продукта C_3F_8 от израсходованного газа i , кг

$B_{\text{C}_3\text{F}_8,i}$ = коэффициент выбросов, кг образовавшегося C_3F_8 /кг израсходованного газа i

$d_{\text{C}_3\text{F}_8}$ = доля побочного продукта C_3F_8 , разрушенного с помощью технологии очистки выбросов, дробь

После расчёта выбросов газа i (E_i) и выбросов побочных продуктов CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 и C_3F_8 для каждого газа ($VPE_{\text{CF}_4,i}$, $VPE_{\text{C}_2\text{F}_6,i}$, $VPE_{\text{CHF}_3,i}$ и $VPE_{\text{C}_3\text{F}_8,i}$) составители кадастра или компании должны просуммировать эти выбросы по всем газам, чтобы получить полные сгруппированные выбросы ФС.

МЕТОД УРОВНЯ 2b – ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ КОНКРЕТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГАЗА

Для метода уровня 2b необходимы данные о суммарных количествах каждого газа, введённого во все процессы травления и во все процессы чистки ($FC_{i,p}$). Таким образом, этот метод делает различие только между крупными типами процессов (травление или чистка камер ХОПФ), но не делает различий между многочисленными вариантами процессов или небольшими подтипами процессов. Общеотраслевые значения по умолчанию можно использовать для всех и каждого из следующих значений:

- часть газа, остающаяся в транспортном контейнере после использования, (h);
- доля израсходованного газа (разложившегося или химически превращённого) для конкретного типа процесса ($U_{i,p}$);
- коэффициент выбросов для побочного продукта CF_4 в процессе конкретного типа ($B_{\text{CF}_4,i,p}$);
- коэффициент выбросов для побочного продукта C_2F_6 в процессе конкретного типа ($B_{\text{C}_2\text{F}_6,i,p}$);
- коэффициент выбросов для побочного продукта CHF_3 в процессе конкретного типа ($B_{\text{CHF}_3,i,p}$); и
- коэффициент выбросов для побочного продукта C_3F_8 в процессе конкретного типа ($B_{\text{C}_3\text{F}_8,i,p}$);

В таблице 6.6 также представлены значения по умолчанию для доли газа, разрушенной с помощью технологии очистки выбросов, для конкретного типа процесса ($d_{i,p}$, $d_{\text{CF}_4,p}$, $d_{\text{C}_2\text{F}_6,p}$, $d_{\text{CHF}_3,p}$ и $d_{\text{C}_3\text{F}_8,p}$). Если технологии очистки выбросов не применяются, то значение по умолчанию для $a_{i,p}$ (объёмная доля газа, введённого в процессы с применением технологии очистки выбросов) равно нулю. Значения по умолчанию для $U_{i,p}$, $B_{\text{CF}_4,i,p}$, $B_{\text{C}_2\text{F}_6,i,p}$, $B_{\text{CHF}_3,i,p}$ и $B_{\text{C}_3\text{F}_8,i,p}$ представляют собой просто средневзвешенные значения, сформированные для каждого газа, по *всем* процессам травления и по *всем* ХОПФ процессам. Коэффициенты выбросов для компании или завода можно заменить значениями по умолчанию, если таковые известны. Эти уравнения учитывают использование оборудования для снижения выбросов на отдельных заводах, но не учитывают разницу между отдельными процессами или аппаратами или между отдельными заводами со своим специфическим набором процессов и аппаратов. Таким образом, расчёты уровня 2b менее точны, чем расчёты уровня 3. Обратите внимание, что метод уровня 2b применим для производства полупроводников и ТПТ-ППД.

Выбросы в результате использования конкретного ФС (FC_i) состоят из выбросов самого газа i плюс выбросы CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 и C_3F_8 , образовавшихся в качестве побочных продуктов в процессе использования газа i . Следующий расчёт следует повторить для каждого газа каждого типа процесса:

УРАВНЕНИЕ 6.7
МЕТОД УРОВНЯ 2b для ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ФС

$$E_i = (1-h) \cdot \sum_p [FC_{i,p} \cdot (1-U_{i,p}) \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{i,p})]$$

Где

E_i = выбросы газа i , кг

p = тип процесса (травление или чистка камер для ХОПФ)

$FC_{i,p}$ = потребление газа i , введённого в процесс типа p (например, CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , α - C_4F_8 , α - C_4F_8O , C_4F_6 , C_3F_8 , CHF_3 , CH_2F_2 , NF_3 , SF_6), кг

h = часть газа, остающаяся в транспортном контейнере после использования, дробь

$U_{i,p}$ = рабочий расход для каждого газа i и процесса типа p (часть, разрушенная или химически преобразованная), дробь.

$a_{i,p}$ = объёмная доля газа i , введённого в процесс типа p с применением технологий очистки выбросов (для компании или завода), дробь

$d_{i,p}$ = доля газа i , разрушенного с помощью технологии очистки выбросов, применяемой в процессе типа p (если в процессе типа p используется более одной технологии очистки выбросов, то $d_{i,p}$ = среднее значение доли, разрушенной с помощью этих технологий очистки, в которых каждая доля взвешена по отношению к количеству газа, вводимого в аппарат, работающий по соответствующей технологии очистки), дробь

УРАВНЕНИЕ 6.8
ВЫБРОСЫ ПОБОЧНОГО ПРОДУКТА CF_4

$$BPE_{CF_4,i} = (1-h) \cdot \sum_p [B_{CF_4,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{CF_4,p})]$$

Где

$BPE_{CF_4,i}$ = выбросы побочного продукта CF_4 образовавшегося из газа i , кг

$B_{CF_4,i,p}$ = коэффициент выбросов для побочного продукта CF_4 , образовавшегося из газа i в процессе типа p , кг образовавшегося CF_4 /кг израсходованного газа i

$d_{CF_4,p}$ = доля побочного продукта CF_4 , разрушенного с помощью технологии очистки выбросов в процессе типа p (например, тип очистки выбросов из таблицы 6.6), дробь

УРАВНЕНИЕ 6.9
ВЫБРОСЫ ПОБОЧНОГО ПРОДУКТА C_2F_6

$$BPE_{C_2F_6,i} = (1-h) \cdot \sum_p [B_{C_2F_6,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{C_2F_6,p})]$$

Где

$BPE_{C_2F_6,i}$ = выбросы побочного продукта C_2F_6 образовавшегося из газа i , кг

$B_{C_2F_6,i,p}$ = коэффициент выбросов для побочного продукта C_2F_6 , образовавшегося из газа i в процессе типа p , кг образовавшегося C_2F_6 /кг израсходованного газа i

$d_{C_2F_6,p}$ = доля побочного продукта C_2F_6 разрушенного с помощью технологии очистки выбросов в процессе типа p (например, тип очистки выбросов из таблицы 6.6), дробь

УРАВНЕНИЕ 6.10
ВЫБРОСЫ ПОБОЧНОГО ПРОДУКТА CHF₃

$$BPE_{CHF_3,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{CHF_3,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{CHF_3,p}) \right]$$

Где

$BPE_{CHF_3,i}$ = выбросы побочного продукта CHF₃, образовавшегося из газа i , кг

$B_{CHF_3,i,p}$ = коэффициент выбросов для побочного продукта CHF₃, образовавшегося из газа i в процессе типа p , кг образовавшегося CHF₃ /кг израсходованного газа i

$d_{CHF_3,p}$ = доля побочного продукта CHF₃, разрушенного с помощью технологии очистки выбросов в процессе типа p (например, тип очистки выбросов из таблицы 6.6), дробь

УРАВНЕНИЕ 6.11
ВЫБРОСЫ ПОБОЧНОГО ПРОДУКТА C₃F₈

$$BPE_{C_3F_8,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{C_3F_8,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{C_3F_8,p}) \right]$$

Где

$BPE_{C_3F_8,i}$ = выбросы побочного продукта C₃F₈ образовавшегося из газа i , кг

$B_{C_3F_8,i,p}$ = коэффициент выбросов для побочного продукта C₃F₈, образовавшегося из газа i в процессе типа p , кг образовавшегося C₃F₈ /кг израсходованного газа i

$d_{C_3F_8,p}$ = доля побочного продукта C₃F₈, разрушенного с помощью технологии очистки выбросов в процессе типа p (например, тип очистки выбросов из таблицы 6.6), дробь

Обратите внимание, что среди материалов, которые обычно используются при травлении и чистке, многочисленные прекурсоры ФС могут применяться одновременно, а выбросы побочных продуктов CF₄, C₂F₆, CHF₃ или C₃F₈ могут происходить от разрушения одного отдельного прекурсора ФС. В таких случаях выбросы побочных продуктов CF₄, C₂F₆, CHF₃ или C₃F₈ следует отражать в отчёте как производные от ФС с наибольшим массовым расходом.

МЕТОД УРОВНЯ 3 – ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ КОНКРЕТНОГО ПРОЦЕССА

В методе уровня 3 также используются уравнения 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 и 6.11. Однако для этого метода необходимы значения на уровне завода (компании) для всех параметров этого уравнения для каждого отдельного процесса или для каждого небольшого подтипа процессов (например, травление нитрида кремния или чистка камеры для усиленного плазмой химического осаждения из газовой фазы (УПХОГ)). Поэтому при использовании уравнений 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 и 6.11 составители кадастра должны интерпретировать p в этих уравнениях как конкретный процесс (например, травление нитрида кремния, чистка камеры для усиленного плазмой химического осаждения из газовой фазы (УПХОГ)), а не как тип процесса.

Значения, используемые для этих параметров выбросов, должны быть тщательно задокументированы для обеспечения прозрачности и сравнимости (см. раздел 6.2.2).

Образование CF₄ из углеродсодержащих плёнок в процессе производства полупроводников

Методы уровня 2а, 2б и 3 учитывают выбросы CF₄, образующиеся в процессе удаления через травление углеродсодержащих материалов с низкой диэлектрической постоянной (k) или в процессе чистки реакторов ХОПФ, содержащих плёнки с низким k или карбидные плёнки, при производстве полупроводников. CF₄ может образоваться даже если прекурсор ФС не содержит углерода или если прекурсор ФС не является парниковым газом.

Например, чистка плёнок с низким k в реакторах ХОПФ с помощью NF₃ приводит к образованию CF₄ в качестве побочного продукта. В этих случаях уравнение 6.7 следует использовать для оценки выбросов NF₃, а результат расчёта по уравнению 6.8 использовать для отображения выбросов CF₄ от этого

процесса. CF_4 может образоваться также в тех случаях, когда для чистки камеры используют F_2 , COF_2 или ClF_3 . Тогда выбросы CF_4 рассчитывают по уравнению 6.8, и результат складывают с результатом расчёта общих выбросов CF_4 по уравнению 6.7. В обоих случаях $V_{CF_4,ip}$ должен рассматриваться как массовая доля образовавшегося CF_4 по отношению к массе чистящего или травильного газа, введённого в реактор.

После оценки выбросов каждого фторсодержащего газа и выбросов побочных продуктов CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 и C_3F_8 составители кадастра или компании должны просуммировать эти выбросы по всем газам, чтобы получить оценку сгруппированных выбросов ФС от конкретного процесса.

Блок 6.1

ПРИМЕР ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Если источник использует NF_3 (для чистки камеры или травления), CHF_3 (травление) и CF_4 (травление), то общие выбросы (если используются плёнки с низким k) рассчитывают по уравнению 6.7 для NF_3 , CHF_3 и CF_4 и по уравнению 6.8 для образования CF_4 при удалении плёнок с низким k с помощью NF_3 . Общие выбросы можно выразить уравнением:

$$\text{Общие выбросы ФС} = E_{NF_3} + E_{CHF_3} + E_{CF_4} + VPE_{CF_4, NF_3}$$

6.2.1.2 ТЕПЛОНОСИТЕЛИ

Имеется две основные методики оценки выбросов от использования теплоносителей. Выбор метода зависит от доступности данных о деятельности по использованию теплоносителей и отображён на схеме принятия решений (см. рисунок 6.2 (Схема принятия решений по оценке выбросов ФС от утечек теплоносителей), см. также раздел 1.5 главы 1 (Выбор между подходом, основанным на балансе масс, и подходом, основанным на коэффициентах выбросов)).

УРОВЕНЬ 1 - ТЕПЛОНОСИТЕЛИ

Уровень 1 используют тогда, когда отсутствуют данные о теплоносителях на уровне компании. Это менее точный из двух методов оценки выбросов от утечки теплоносителей. Этот метод, в отличие от метода уровня 2, даёт оценку сгруппированных выбросов – средневзвешенные выбросы для всех жидких ФС, выраженные в виде массы C_6F_{14} ¹⁰. Расчёт основан на усреднённом коэффициенте выбросов, который равен средним выбросам на единицу кремния, потреблённого при производстве полупроводников. Формулу метода описывает уравнение 6.12.

УРАВНЕНИЕ 6.12

МЕТОД УРОВНЯ 1 ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЩИХ ВЫБРОСОВ ФС ОТ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

$$FC_{\text{жидк., всего}} = EF_1 \cdot C_u \cdot C_d$$

Где

$FC_{\text{жидк., всего}}$ = общие выбросы ФС, выраженные в виде массы C_6F_{14} , Мт C_6F_{14}

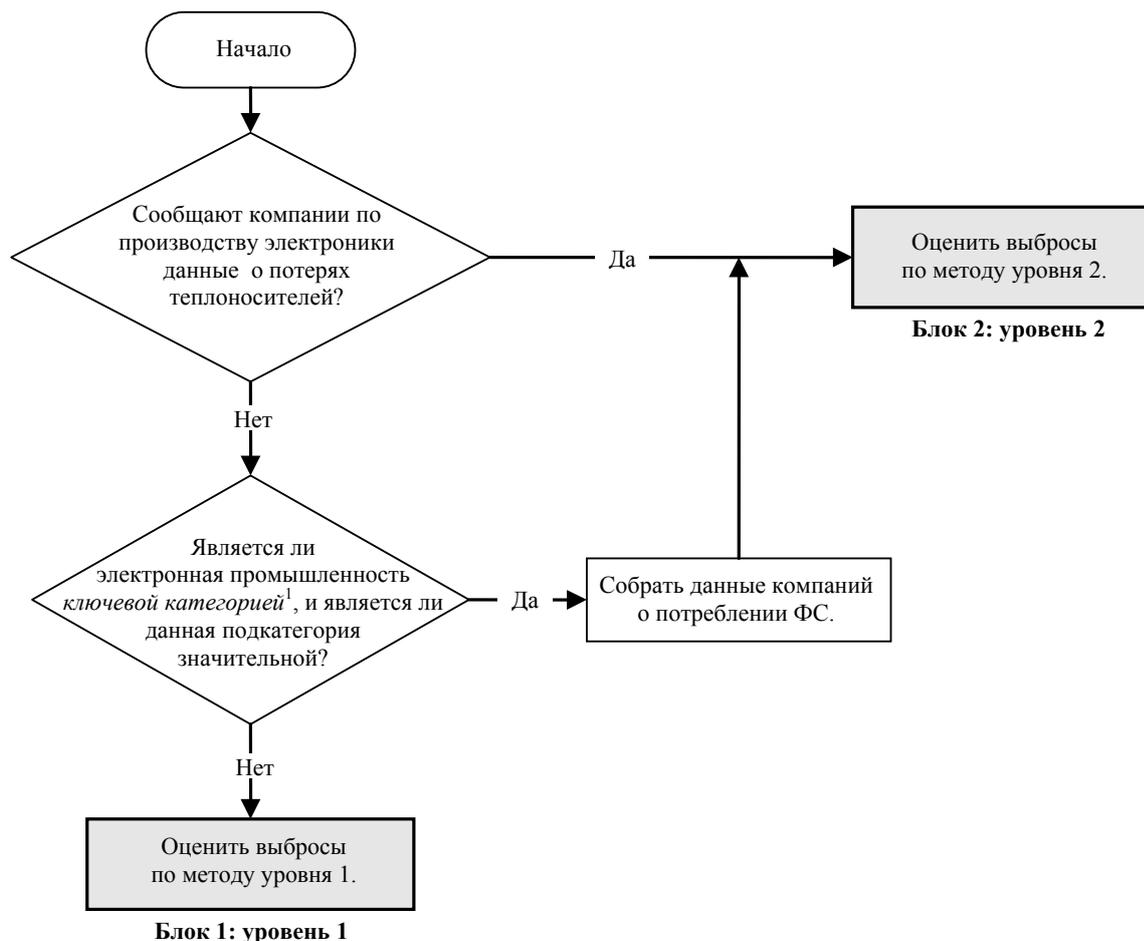
EF_1 = коэффициент выбросов (усреднённые выбросы ФС на $Гм^2$ кремния, потреблённого за период, выраженные в единицах массы C_6F_{14} (см. таблицу 6.2.)), Мт $C_6F_{14}/Гм^2$

C_u = средний коэффициент использования мощностей для всех предприятий по производству полупроводников в стране за период, доля

C_d = проектная мощность предприятий по производству полупроводников в стране, $Гм^2$

¹⁰ При отсутствии значений ПГП в качестве замены был использован подходящий ПГП для C_6F_{14} (для вывода коэффициента выбросов по умолчанию). (См. Inventory of U.S. Greenhouse Gas and Sinks: 1990-2003, сноска к таблицам 4-58, стр.166. (U.S. EPA, 2005))

Рисунок 6.2 Схема принятия решений по оценке выбросов ФС от утечек теплоносителей в электронной промышленности



Примечания:

1. О *ключевых категориях* и об использовании схемы принятия решений см. главу 4 тома 1 (Методологический выбор и определение ключевых категорий) (комментарий в разделе 4.1.2 об ограниченных источниках).

МЕТОД УРОВНЯ 2 - ТЕПЛОНОСИТЕЛИ

Имеется один метод уровня 2 для расчёта выбросов от использования каждой из ФС жидкостей. Этот метод основан на балансе масс и учитывает потребление ФС за год. Этот метод используется в том случае, если известны данные на уровне компании. В течение года жидкие ФС применяются для заполнения нового оборудования и для замены ФС, потерянного из старого оборудования в результате испарения. Метод уровня 2 пренебрегает потерями жидкости в процессе заполнения нового или уже работающего оборудования и при списании отработавшего оборудования (что вполне понятно для таких дорогих жидкостей).¹¹ Составители кадастра должны запрашивать у компаний сведения о химическом составе жидкостей, для которых проводится оценка выбросов. Формулу метода описывает уравнение 6.13.

¹¹ Цены на теплоносители варьируются от 55 до 130 долларов за литр. По оценкам компании 3М, производителя широко используемых теплоносителей, генерация заводов 2000 года может терять 1 900 литров в год через испарение. Производители тестового оборудования, которые используют теплоносители, сообщают о потерях около 30 литров в год на систему современного оборудования и менее (или приблизительно) 50 литров в год на систему старой конструкции.

УРАВНЕНИЕ 6.13
МЕТОД УРОВНЯ 2 ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ ФС ОТ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

$$FC_i = \rho_i \cdot [I_{i,t-1}(l) + P_{i,t}(l) - N_{i,t}(l) + R_{i,t}(l) - I_{i,t}(l) - D_{i,t}(l)]$$

Где

FC_i = выбросы ФС i , кг

ρ_i = плотность жидкого ФС i , кг/литр

$I_{i,t-1}(l)$ = запас жидкого ФС i в конце предыдущего периода, литры

$P_{i,t}(l)$ = нетто-закупки жидкого ФС i за период (нетто от всех покупок и возврата), литры

$N_{i,t}(l)$ = общий объём заливки (или паспортная емкость) для нового, не работавшего оборудования, литры

$R_{i,t}(l)$ = общий объём заливки (или паспортная емкость) для списанного или проданного оборудования, литры

$I_{i,t}(l)$ = запас жидкого ФС i в конце периода, литры

$D_{i,t}(l)$ = количество ФС i , извлечённое из отработанного оборудования и перемещённое за пределы предприятия, за период, литры

6.2.2 Выбор коэффициентов выбросов¹²

6.2.2.1 ТРАВЛЕНИЕ И ЧИСТКА ХОПФ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ, ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

УРОВЕНЬ 1

Коэффициенты выбросов по умолчанию для метода уровня 1 представлены в таблице 6.2 далее.

При использовании уровня 1 ни в коем случае не следует менять множество ФС или значения коэффициентов выбросов из таблицы 6.2. Не следует сочетать оценки выбросов, рассчитанные по методу уровня 1, с оценками выбросов по методам уровней 2 и 3. К примеру, составители кадастра не должны использовать коэффициент для CF_4 уровня 1 для оценки выбросов CF_4 от полупроводников или комбинировать его с результатами расчётов для других ФС газов по методу уровня 2 или 3. Следует также отметить, что коэффициенты выбросов ФС уровня 1, представленные в таблице 6.2, нельзя использовать для каких-либо других целей, кроме расчётов годовых суммарных выбросов ФС от производства полупроводников, ТПТ-ППД или ФЭЭ, для составления национального кадастра парниковых газов.

¹² Источники и методы, используемые для выведения коэффициентов выбросов (если они не описаны надлежащим образом в главе 6) можно найти в документе Burton (2006).

ТАБЛИЦА 6.2 КОЭФФИЦИЕНТЫ УРОВНЯ 1 ДЛЯ ВЫБРОСОВ ОТДЕЛЬНЫХ ГАЗОВ ОТ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ							
Сектор электронной промышленности	Коэффициент выбросов (масса на единицу площади обработанных подложек)						
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	C ₃ F ₈	NF ₃	SF ₆	C ₆ F ₁₄
Полупроводники, кг/м ²	0,9	1,	0,04	0,05	0,04	0,2	НД
ТПТ-ППД, г/м ²	0,5	НД	НД	НД	0,9	4,	НД
ФЭЭ ^a , г/м ²	5	0,2	НД	НД	НД	НД	НД
Теплоносители ^b , кг/м ²	НД	НД	НД	НД	НД	НД	0,3

^a Коэффициенты выбросов взяты из неопубликованных работ Fthenakis, Alsema и Agostinelli. (Fthenakis, 2005). Обратите внимание, что коэффициент применим только для силиконовых технологий и применяется для технологии снижения выбросов.

^b Коэффициент выбросов для теплоносителей, которые имеют одинаковый ТПП; C₆F₁₄ представляет собой допустимую замену (для расчетов). Вывод этого коэффициента описан у Burton, 2004; он частично основан на работе Tuma и Tousignant (2001).

УРОВЕНЬ 2

Как уже отмечалось, коэффициенты выбросов, выведенные на основании простых переменных электронного производства, не учитывают всех факторов, которые влияют на выбросы. Для получения надёжной оценки необходимо подготовить данные для каждого из следующих параметров:

- применявшиеся газы;
- тип процесса (ХОПФ или травление);
- марка аппарата;
- технология очистки выбросов.

Были разработаны значения по умолчанию для параметров, используемых в методах уровня 2a и 2b (см. таблицу 6.1), на основании прямых измерений, литературных данных и экспертной оценки (см. таблицы 6.3, 6.4, и 6.5 (Коэффициенты выбросов ФС уровня 2, принятые по умолчанию для выбросов от производства полупроводников¹², ТПП-ППД¹³, и ФЭЭ¹², соответственно). В электронной промышленности трудно сформулировать всё разнообразие производственных условий, поэтому параметры выбросов по умолчанию по своей внутренней сути являются ненадёжными. В то же время точность можно повысить, используя большее число измеренных данных, а также применяя коэффициенты к схожим процессам, в которых используются схожие или одинаковые химические вещества; разработка коэффициентов выбросов по умолчанию обязательно включает некоторую форму группирования по всем данным.

Специалисты электронной промышленности полагают, что технические инновации, внедряемые поставщиками химических веществ и оборудования, а также производителями электроники, приведут к значительному снижению выбросов в будущем (начиная с 2006 года). Вместе с этими изменениями также будут эволюционировать коэффициенты выбросов для этих категорий. В секторах производства полупроводников и ТПП-ППД были разработаны механизмы оценки глобальных коэффициентов выбросов (при участии Всемирного совета по полупроводникам (World Semiconductor Council) и Комитета по сотрудничеству производителей LCD (World LCD Industry Cooperation Committee) соответственно). В промышленности ФЭЭ ведется разработка механизма отслеживания выбросов ПФУ в процессе производства ФЭЭ. (Fthenakis, 2006)

Прогнозы предсказывают как увеличение, так и уменьшение использования ФС в процессе производства ФЭЭ. Имеются признаки того, что в случае роста потребления ФС в этой отрасли будут предприняты усилия, направленные на снижение выбросов (Agostinelli *et al.*, 2004; Rentsch *et al.*, 2005). Составителям кадастра рекомендуется периодически консультироваться у представителей промышленности для лучшего понимания мировых и национальных условий.

¹³ Коэффициенты выбросов для производства ТПП-ППД представляют собой простые (невзвешенные) средние значения, разработанные на основании данных для отдельных газов и процессов, опубликованных Nishida *et al.* (2005).

ТАБЛИЦА 6.3
Коэффициенты выбросов уровня 2, принятые по умолчанию для выбросов от производства полупроводников

Технологический газ (i)	Парниковые газы с ПГП, утверждёнными в Третьем докладе об оценке МГЭИК									Парниковые газы, ПГП которых не представлены в Третьем докладе об оценке МГЭИК			Непарниковые газы, дающие побочные продукты - ФС ‡	
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	и-C ₄ F ₈	Удалённый NF ₃	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₄ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Уровень 2a														
1-Ui	0,9	0,6	0,4	0,1	0,4	0,1	0,02	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	NA	NA
BCF ₄	NA	0,2	0,07	0,08	0,1	0,1	0,02 [†]	0,09	NA	0,3	0,1	0,1	0,02 [†]	0,02 [†]
BC ₂ F ₆	NA	NA	NA	NA	NA	0,1	NA	NA	NA	0,2	0,04	NA	NA	NA
BC ₃ F ₈	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,04	NA	NA
Уровень 2b														
1-Ui, травл.	0,7*	0,4*	0,4*	0,06*	НД	0,2*	НД	0,2	0,2	0,1	0,2	НД	НД	НД
1-Ui, ХОПФ	0,9	0,6	НД	НД	0,4	0,1	0,02	0,2	НД	НД	0,1	0,1	НД	НД
BCF ₄ , травл.	НД	0,4*	0,07*	0,08*	НД	0,2	НД	НД	НД	0,3*	0,2	НД	НД	НД
BC ₂ F ₆ , травл.	НД	НД	НД	НД	НД	0,2	НД	НД	НД	0,2*	0,2	НД	НД	НД
BCF ₄ , ХОПФ	НД	0,1	НД	НД	0,1	0,1	0,02 [†]	0,1 [†]	НД	НД	0,1	0,1	0,02 [†]	0,02 [†]
BC ₂ F ₆ , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
BC ₃ F ₈ , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	0,04	НД	НД

Примечания: НД – нет данных, означает, что в настоящее время не применимо из-за отсутствия информации.
‡ Коэффициенты выбросов по умолчанию для F₂ и COF₂ можно применить для чистки плёнки с низким k в реакторах ХОПФ с помощью ClF₃.
* Оценка учитывает травильные процессы с участием нескольких газов.
† Оценка отражает присутствие процессов травления веществ с низким k, карбидов и травление с помощью нескольких газов, которые могут содержать углеродсодержащие добавки ФС.

ТАБЛИЦА 6.4
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЫБРОСОВ УРОВНЯ 2, ПРИНЯТЫЕ ПО УМОЛЧАНИЮ ДЛЯ ВЫБРОСОВ ФС ОТ ПРОИЗВОДСТВА LCD

Технологический газ (i)	Парниковые газы с ПГП, утверждёнными в Третьем докладе об оценке МГЭИК								Парниковые газы, ПГП которых не представлены в Третьем докладе об оценке МГЭИК			Непарниковые газы, дающие побочные продукты - ФС		
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	и-C ₄ F ₈	Удалённый-NF ₃	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₄ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Уровень 2a														
1-U _i	0,6	НД	0,2	НД	НД	0,1	0,03	0,3	0,6	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CF4}	НД	НД	0,07	НД	НД	0,009	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CHF3}	НД	НД	НД	НД	НД	0,02	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C2F6}	НД	НД	0,05	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C3F8}	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
Уровень 2b														
1-U _i , травл.	0,6	НД	0,2	НД	НД	0,1	НД	НД	0,3	НД	НД	НД	НД	НД
1-U _i , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	0,03	0,3	0,9	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CF4} , травл.	НД	НД	0,07	НД	НД	0,009	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CHF3} , травл.	НД	НД	НД	НД	НД	0,02	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C2F6} , травл.	НД	НД	0,05	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CF4} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C2F6} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C3F8} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД

Примечания: НД – нет данных; означает, что в настоящее время не применимо из-за отсутствия информации.

ТАБЛИЦА 6.5
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЫБРОСОВ УРОВНЯ 2, ПРИНЯТЫЕ ПО УМОЛЧАНИЮ ДЛЯ ВЫБРОСОВ ФС ОТ ПРОИЗВОДСТВА ФЭЭ

Process Gas (i)	Парниковые газы с ППП, утверждёнными в Третьем докладе об оценке МГЭИК								Парниковые газы, ППП которых не представлены в Третьем докладе об оценке МГЭИК			Непарниковые газы, дающие побочные продукты - ФС		
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	и-С ₄ F ₈	Удалённый-NF ₃	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₄ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Уровень 2а														
1-Ui	0,7	0,6	0,4	НД	0,4	0,2	НД	0,2	0,4	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CF4}	НД	0,2	НД	НД	0,2	0,1	НД	0,05	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C2F6}	НД	НД	НД	НД	НД	0,1	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C3F8}	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
Уровень 2б														
1-Ui, травл.	0,7	0,4	0,4	НД	НД	0,2	НД	НД	0,4	НД	НД	НД	НД	НД
1-Ui, ХОПФ	НД	0,6	НД	НД	0,1	0,1	НД	0,3	0,4	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CF4} , травл.	НД	0,2	НД	НД	НД	0,1	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C2F6} , травл.	НД	НД	НД	НД	НД	0,1	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CF4} , ХОПФ	НД	0,2	НД	НД	0,2	0,1	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C2F6} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C3F8} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД

Примечания: НД – нет данных; означает, что в настоящее не применимо из-за отсутствия информации.

В таблицах 6.3 и 6.4 имеется две колонки для NF_3 : NF_3 и удалённый NF_3 . Удалённый NF_3 относится к методу чистки, в котором агент для чистки плёнки (атомы фтора) образуется из NF_3 в плазме вне (удалённо) камеры, которую чистят. А второй (называемый просто NF_3) относится к процессу чистки с помощью NF_3 in-situ, наподобие процесса с другими чистящими газами, такими как C_2F_6 и C_3F_8 .

Значение по умолчанию для доли газа, остающейся в транспортном контейнере, равно 0,10.

ТАБЛИЦА 6.6 КОЭФФИЦИЕНТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ УРОВНЯ 2а и 2b ПРИНЯТЫЕ ПО УМОЛЧАНИЮ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ^{a,b,c} СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ФС, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ							
Технология очистки выбросов	CF_4	C_2F_6	CHF_3	C_3F_8	C_4F_8	NF_3 ^f	SF_6
Разрушение ^c	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,95	0,9
Захват/извлечение ^d	0,75	0,9	0,9	НИ	НИ	НИ	0,9

^a Значения представляют собой простые (невзвешенные) средние значения коэффициентов эффективности разрушения для всех технологий очистки. Коэффициенты эффективности очистки не применимы к тем технологиям снижения выбросов, которые не рассчитаны на очистку от CF_4 с эффективностью разрушения или удаления ЭРУ $\geq 85\%$, если в составе исходного газа или побочных продуктов присутствует CF_4 , и ЭРУ $\geq 90\%$ для всех других ФС газов. Если производители используют какую-либо другую технологию снижения выбросов, то их эффективность разрушения равна 0% при использовании методов уровня 2.

^b Коэффициенты выбросов уровня 2 с применением технологии очистки выбросов применимы только для аппаратов использованием с электрического нагрева, сжигания топлива, плазмы и катализаторов, которые

- специально предназначены для очистки от ФС
- применяются в рамках назначенного производителем технологического окна и в соответствии с утверждённым графиком работ по техническому обслуживанию и
- были измерены и подтверждены в реальных производственных условиях с заполнением технически обоснованного протокола, с учётом известных ошибок измерения, например, образования побочного продукта CF_4 в процессе обработки C_2F_6 , а также влияния разбавления, использования кислорода или и того и другого в системах по снижению выбросов.

^c Средние значения для технологий очистки, которые используют сжигание топлива, плазму и катализатор.

^d Средние значения для технологий очистки, использующих криогенный и мембранный захват и извлечение.

^e Данные продавца оборудования, проверенные производителями полупроводников. Коэффициенты следует применять только в том случае, если технология снижения выбросов используется и поддерживается на должном техническом уровне в соответствии со спецификациями производителя оборудования для снижения выбросов.

^f Обычно NF_3 мало используется в процессах травления по сравнению с ХОПФ. Средние выбросы NF_3 от травления и ХОПФ, рассчитанные по методу уровня 2b, как правило, не должны быть выше, чем оценки по методам уровня 2a или 1

НИ = не испытано.

Коэффициенты выбросов для аппаратов

Способ расчёта коэффициентов выбросов для аппаратов по методу уровня 2а и 2b одинаков. Коэффициенты выбросов аппаратов определяют как количество парникового газа, выброшенного в атмосферу, поделённое на количество парникового газа, использованного в процессе. Эти коэффициенты выбросов соответствуют члену $(1 - U_i)$ в формулах уровня 2. Например, коэффициент выбросов 0,9 для CF_4 (см. значение для уровня 2а в таблице 6.3, выше) означает, что 90% CF_4 , использованного в процессе, было выброшено в атмосферу в виде CF_4 .

Коэффициенты выбросов для побочных продуктов также были рассчитаны. Наибольшее значение имеют выбросы побочного продукта CF_4 . В целом считается, что единственными газами, которые дают значительные выбросы CF_4 в качестве побочного продукта, являются C_2F_6 и C_3F_8 ; однако данные от производителей аппаратов и поставщиков химических материалов показывают, что CF_4 также образуется из смесей газов (например, смесей, содержащих CHF_3 и CH_2F_2) и C_4F_8 . В результате этого диалога производителями и поставщиками были рассчитаны коэффициенты выбросов для побочного продукта CF_4 от CHF_3 , CH_2F_2 , C_2F_6 , C_3F_8 , C_4F_8 и $\text{C}_4\text{F}_8\text{O}$. Например, коэффициент выбросов 0,1 для C_3F_8 (см. значение для уровня 2а в таблице 6.3 выше) означает, что 10% C_3F_8 , использованного в процессе, было выброшено в атмосферу в виде CF_4 . Однако C_2F_6 может также улетать в результате разложения молекул, например C_4F_6 . Как уже отмечалось ранее, CF_4 может также образоваться в процессе травления или в процессе чистки камер с углеродсодержащими плёнками.

Для того чтобы рассчитать коэффициенты выбросов уровня 2b для аппаратов, необходимо собрать данные от производителей аппаратов и газов. Данные следует собирать по типу процесса (химическое осаждение из паровой фазы (ХОПФ) или травление) и по типу газа (например, C_2F_6 , CF_4). Для исследования выбросов были использованы методы квадрупольной масс-спектрометрии в реальном времени и Фурье-ИК-спектроскопии – наиболее известные методы измерения выбросов от

технологических аппаратов. Обычно для количественной оценки результатов применялись калибровочные стандарты (как правило, 1%-ные смеси в азоте). Протокол измерений и контроль качества соответствовали требованиям Guidelines for Environmental Characterisation of Semiconductor Equipment. (Meyers *et al.*, 2001).¹⁴ Коэффициенты выбросов для уровня 2b (см. таблицы 6.3 и 6.4 выше) равны простому (невзвешенному) среднему значению данных, собранных для каждого газа для травления и ХОПВ, округлённому до первой значащей цифры.^{12, 16}

Для того чтобы определить коэффициенты выбросов уровня 2a для аппаратов, необходимо знать количество газа, израсходованное в типичном процессе производства полупроводников. Коэффициенты выбросов уровня 2a были получены с помощью весовых пропорций, определённых специалистами в этой отрасли для каждого газа, использованного в процессах травления и чистки. Например, коэффициенты выбросов уровня 2b для C_2F_6 (таблица 6.3) равны 0,5 (для травления) и 0,6 (для ХОПВ). Пропорция использования C_2F_6 в процессах травления и чистки камер ХОПВ при производстве полупроводников составляет 20:80. Применение этих пропорций к коэффициентам выбросов даёт коэффициент выбросов C_2F_6 уровня 2a равный 0,6 (до первой значащей цифры). Соответствующая пропорция использования SF_6 в производстве ТПТ-ППД составляет 50:50, что даёт соответствующий коэффициент выбросов уровня 2a равный 0,6 (таблица 6.4).¹⁵

Для коэффициентов выбросов уровня 3 производители полупроводников используют значения для конкретных компаний или заводов (вместо значений из таблицы 6.1). Для того чтобы подтвердить качество оценки коэффициентов выбросов, следует проводить тестирование выбросов в соответствии с утверждёнными методиками.¹⁶ Если тестирование выбросов проводит поставщик, который является третьей стороной, то производитель полупроводников должен убедиться в том, что этот поставщик выполняет все требования редакции 3.0 документа Equipment Environmental Characterisation Guidelines (SIA, 2000). Производители полупроводников, которые используют коэффициенты выбросов, предоставленные поставщиком аппаратов, должны убедиться в том, что они применимы к их конкретному процессу производства. Если методы производства и технологические параметры (например, давление, скорость потока) отклоняются от условий осевой линии, то коэффициенты выбросов могут отличаться от тех, которые предлагает производитель аппарата.

Коэффициенты выбросов для технологий снижения выбросов для методов уровня 2

Технологии снижения выбросов развиваются очень быстро, параллельно с развитием технологий электронной промышленности. Коэффициенты эффективности очистки по умолчанию для различных технологий снижения выбросов, показанные в таблице 6.6, основаны на тестировании оборудования для снижения выбросов, которое было оптимизировано к конкретным процессам и аппаратам. Ожидается, что результаты будут зависеть от видов аппаратов и скоростей потока газа. Коэффициенты эффективности очистки нельзя применять ко всем аппаратам и процессам, используемым на предприятиях по производству полупроводников, жидкокристаллических дисплеев или фотоэлектрических элементов. Показатели эффективности разрушения по умолчанию для уровня 2, представленные в таблице 6.6, применимы только в том случае, если составители кадастра могут, с помощью компаний, показать и задокументировать, что оборудование контроля выбросов работает и получает техническое обслуживание в соответствии со спецификациями производителя. Если компании используют какую-либо другую технологию снижения выбросов, то следует исходить из допущения о том, что их эффективность разрушения равна 0% при использовании методов уровня 2a и 2b.

Условия для использования коэффициентов эффективности очистки выбросов для метода уровня 2 (a и b):

- (i) Технологии снижения конкретных выбросов отсутствуют в списке; коэффициенты эффективности очистки для каждого химического вещества были установлены по результатам тестирования оборудования по очистке выбросов на предприятии по производству полупроводников.

¹⁴ Это руководство было также одобрено производителями плоских индикаторных панелей для измерения выбросов ФС при производстве плоских индикаторных панелей.

¹⁵ Соотношение между видами использования SF_6 50:50 представляет собой усреднённый показатель для регионов-производителей ТПТ-ППД - Японии, Республики Корея и Тайваня. Такая пропорция была предложена Nishida (2006) и Kim (2006).

¹⁶ Один из примеров международно-признанной методики тестирования предложен Meyers *et al.* (2001).

- (ii) Коэффициенты эффективности очистки следует использовать только в том случае, если технология очистки выбросов применяется к выбросам в пределах рабочих параметров оборудования для очистки согласно спецификациями производителя оборудования, чтобы коэффициенты выбросов равны или превышают коэффициенты, перечисленные в таблице 6.6.
- (iii) Коэффициенты эффективности очистки применяются только к той доле выбросов, которая проходит через надлежащим образом работающее и обслуживаемое оборудование по очистке выбросов; коэффициенты эффективности очистки не следует применять, если поток газа идёт в обход этого оборудования, если оборудование работает вразрез со спецификациями производителя или не получает должного технического обслуживания.
- (iv) Коэффициенты эффективности очистки не применимы к технологиям снижения выбросов, которые не рассчитаны на очистку от CF_4 с эффективностью разрушения или удаления (ЭРУ) $\geq 85\%$, если в составе исходного газа или побочных продуктов присутствует CF_4 , и с эффективностью $\geq 90\%$ для всех других ФС газов. Если производители используют какую-либо другую технологию очистки выбросов, то их эффективность разрушения приравнивается к 0% при использовании методов уровня 2.

Коэффициенты эффективности очистки по умолчанию для уровня 2, указанные в таблице 6.6 (Коэффициенты эффективности очистки уровня 2А и 2В принятые по умолчанию для технологий снижения выбросов ФС, применяемых в электронной промышленности) были рассчитаны на основании данных, полученных от поставщиков оборудования, поставщиков технологии снижения выбросов и производителей электроники. Следует отметить, что в расчётах были использованы только данные об оборудовании для снижения выбросов, которое предназначено именно для снижения выбросов ФС. Были получены данные для аппаратов очистки сжиганием (во всех типах такого оборудования используется какое-то топливо), аппаратов плазменной очистки, аппаратов очистки с электрическим нагревом и каталитических аппаратов очистки.

Значения, представленные в таблице 6.6, были выведены на основании всех данных для оптимизированных технологий и для каждого исходного газа с округлением до 5% (например, среднее значение 98% будет округлено до 0,95). Средние значения были округлены для того, чтобы отразить, что (i) аппараты для снижения выбросов имеют разную эффективность в зависимости от газа, на разрушение которого они настроены, и (ii) аппараты для снижения выбросов имеют разную эффективность в зависимости от типа оборудования, которое установлено вместе с ними (150 мм, 200 мм или 300 мм платы), количества ФС газа, протекающего через данный инструмент, и суммарного потока газа в атмосферу, протекающего через этот аппарат по очистке выбросов. Аппарат для очистки выбросов может разрушать 99% ФС, если он настроен на данное ФС; в то время как обычный аппарат может разрушить менее 95% этого ФС, если он настроен на разрушение другого вещества или если данное вещество разрушается в аппарате, который для него не предназначен или если поток ФС или общий поток выбросов превышает некий предел. Производители электроники и оборудования для очистки выбросов должны убедиться в том, что установленная система очистки имеет правильные размеры и надлежащее техническое обслуживание и что аппарат для снижения выбросов может обеспечить эффективность выбросов, которая равна и превосходит коэффициент эффективности очистки по умолчанию из таблицы 6.6.

6.2.2.2 ЖИДКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ

Коэффициент выбросов для метода уровня 1 представлены в таблице 6.2 далее. Не существует коэффициента выбросов для метода уровня 2 для оценки выбросов от испарения теплоносителей.

6.2.3 Выбор данных о деятельности

Данные о деятельности для электронной промышленности состоят из данных о продажах газов и использовании или количестве подложек, обработанных за год (например, количество m^2 кремния, переработанного для изготовления полупроводников). Для более требовательных к информации методов уровня 2 необходимы данные на уровне завода или компании. Для методов уровня 1 составители кадастра должны будут определить суммарную площадь поверхности электронных подложек, обработанных за год. Потребление кремния можно оценить с использованием данных подходящего периодического издания World Fab Watch (WFW), которое ежеквартально выпускает Международная промышленная ассоциация производителей полупроводниковых элементов и материалов (Semiconductor

Equipment & Materials International (SEMI)¹⁷. Эта база данных содержит перечень заводов (промышленных, а также научно-исследовательских, пилотных и т.д.) по всему миру с информацией об их местонахождении, проектной мощности, размере платы и много другое. Аналогично, база данных на диске Flat Panel Display Fabs, который выпускает SEMI, содержит оценку мирового потребления стекла для производства ТПТ-ППД.

В таблице 6.7 представлены цифры проектных мощностей. Заводы по производству ТПТ-ППД и полупроводников в течение длительных периодов (например целый год) работают не на полную проектную мощность. Объёмы производства предприятия зависят от спроса на продукт. Опубликованная статистика по производству полупроводников свидетельствует о том, что среднегодовое мировое использование мощностей за период 1991 – 2000 год менялось от 76 до 91%, при этом среднее значение составило 82% и наиболее вероятное – 80%. Если данные об использовании мощностей в стране не известны, то предполагают, что в промышленности полупроводников загрузка производственных мощностей равна 80%. Эта цифра должна согласованно применяться во временном ряду оценок. Для производства ТПТ-ППД нет открыто опубликованных данных о загрузке мощностей. В секторе производства ТПТ-ППД, также как в секторе полупроводников, принято снижать цену на продукты, чтобы поддерживать максимально целесообразную степень использования мощностей. Для оценки потребления предлагается по аналогии использовать загрузку 80% от проектной мощности из таблицы 6.7 для производства ТПТ-ППД в стране. Опубликованные данные о загрузке мощностей по производству ФЭЭ колеблются между 77 – 92%, со средним значением 86% за период 2003-2004 годы. Поэтому для C_u (см. уравнение 6.1) рекомендуется использовать значение 86% по умолчанию.

При оценке выбросов в процессе производства ФЭЭ следует учесть долю промышленности, где фактически применяют ФС (C_{CV} в уравнении 6.1). Последние исследования указывают на то, что ФС фактически используются при производстве 40-50% ФЭЭ, при этом тенденция использования ФС может расти, поэтому рекомендуется применять значение по умолчанию $C_{CV} = 0,5$.

В таблице 6.7 представлены производственные мощности стран в 2003, 2004 и 2005 году, которые в целом охватывают более 90% мировых мощностей 2003 года.

¹⁷ Слово 'fab' является синонимом чистой комнаты/чистых производственных помещений. Производство полупроводников и плоских индикаторных панелей часто называют фабриками; от фабрик происходит слово «fab».

ТАБЛИЦА 6.7
СУММАРНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ МОЩНОСТИ СТРАН В 2003, 2004 И 2005 ГОДУ, ВЫРАЖЕННЫЕ В ММ² КРЕМНИЯ (Si) И СТЕКЛА

Суммарные количества для стран	Годовые проектные мощности, Мм ² кремния			Годовые проектные мощности, Мм ² стекла		
	2003 ¹	2004 ²	2005 ²	2003 ¹	2004 ²	2005 ²
Австралия	0,0008	0,0008	0,0008	НП	НП	НП
Австрия	0,0201	0,0201	0,0201	НП	НП	НП
Белоруссия	0,0077	0,0077	0,0077	НП	НП	НП
Бельгия	0,0040	0,0040	0,0040	НП	НП	НП
Великобритания	0,0597	0,0597	0,0936	НП	НП	НП
Венгрия	0,0006	0,0006	0,0006	НП	НП	НП
Вьетнам	0,0000	0,0000	0,0000	НП	НП	НП
Германия	0,1622	0,1622	0,1622	НП	НП	НП
Израиль	0,0310	0,0310	0,0564	НП	НП	НП
Индия	0,0128	0,0128	0,0128	НП	НП	НП
Ирландия	0,0175	0,0430	0,0430	НП	НП	НП
Италия	0,0431	0,0431	0,0609	НП	НП	НП
Канада	0,0041	0,0041	0,0041	НП	НП	НП
Китай	0,1436	0,1982	0,3243	0,0432	0,0432	0,8154
Китай, Гонконг	0,0059	0,0059	0,0059	НП	НП	НП
Латвия	0,0019	0,0019	0,0019	НП	НП	НП
Малайзия	0,0284	0,0284	0,0284	НП	НП	НП
Нидерланды	0,0301	0,0301	0,0301	0,0209	0,0209	0,0209
Россия	0,0250	0,0250	0,0325	НП	НП	НП
Сингапур	0,1730	0,1730	0,1985	0,2821	0,2821	0,2821
Словакия	0,0043	0,0043	0,0043	НП	НП	НП
США	0,6732	0,6921	0,7190	0,0000	0,0000	0,0000
Тайланд	0,0000	0,0000	0,0094	НП	НП	НП
Турция	0,0000	0,0000	0,0000	НП	НП	НП
Франция	0,0653	0,0674	0,0674	НП	НП	НП
Чешская Республика	0,0057	0,0057	0,0057	НП	НП	НП
Швейцария	0,0098	0,0098	0,0098	НП	НП	НП
Швеция	0,0019	0,0019	0,0019	НП	НП	НП
Южная Африка	0,0021	0,0021	0,0021	НП	НП	НП
Южная Корея	0,3589	0,3742	0,3937	5,8789	9,4679	12,4857
Япония	0,9091	0,9235	0,9639	4,5746	5,3256	6,9201
Всего в мире	3,3206	3,4972	3,8849	15,0572	23,9959	33,7459

¹ Суммарные значения для стран включают работающие производственные мощности
² Суммарные значения для стран включают строящиеся и запланированные производственные мощности.
НП = не применимо.
Источники: база данных World Fab Watch «January 2004 Edition for Semiconductor Manufacturing and Flat Panel Display Fabs on Disk Database» (Strategic Marketing Associates, 2004a), и October 2004 Edition for TFT-FPD Manufacturing (Strategic Marketing Associates, 2004b).

ТАБЛИЦА 6.8
СУММАРНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ФЭЭ В СТРАНАХ^a В 2003 ГОДУ, ММ²

Австралия	0,135
Австрия	0,0307
Великобритания	0,0269
Германия	0,817
Дания	0,00254
Испания	0,715
Италия	0,100
Канада	0,0154
Норвегия	0,0138
Португалия	0,115
США	1,02
Франция	0,162
Швейцария	0,00238
Швеция	0,377
Южная Корея	0,462
Япония	3,72

^a Мощности для всех технологий производства ФЭЭ, включая те, которые возможно не используют ФС при производстве ФЭЭ; среднее мировое использование мощностей в 2003 году равно 86%.
 Источник: IEA, 2004. Страны-участницы исследования по ФЭЭ.

6.2.4 Полнота

Полный учёт выбросов от полупроводниковой промышленности возможен в большинстве стран, поскольку в каждой стране имеется лишь небольшое число компаний и заводов этого профиля. Имеется четыре вопроса, связанные с полнотой, которые требуют выяснения:

- **Другие побочные продукты.** Некоторые побочные продукты образуются в результате использования ФС для чистки камер и травления. Уже отмечалось, что образование CF_4 и C_2F_6 может происходить в результате разрушения других ФС газов. Кроме того, образование CF_4 наблюдали при чистке ХОПФ камер с пленками с низким k . В этом случае для получения точной оценки выбросов следует применять метод уровня 3.
- **Новые химические вещества.** Полнота будет предметом рассмотрения в будущем, когда промышленность оценит и внедрит новые химические процессы, направленные на повышение качества продукта. Усилия по снижению выбросов ФС в масштабах всей отрасли также ускорят исследование новых химических веществ. Таким образом, *эффективная практика* в данной отрасли состоит в разработке механизма, который учитывал бы парниковые газы, не включённые в IPCC Third Assessment Report (например, C_4F_6 , C_5F_8 , Fluorinerts[™] и Galdens[®]). Эти новые ФС материалы характеризуются высоким ПГП, либо могут давать выбросы побочных продуктов с высоким ПГП.
- **Другие источники.** Небольшое количество ФС может выделяться в процессе обращения (например, дистрибуции), а также из таких источников, как научно-исследовательские установки (например, в вузах), от поставщиков инструмента. Эти выбросы считаются незначительными (менее 1% от суммарных выбросов в этой отрасли).
- **Другие продукты или процессы.** Выяснилось, что ФС применяются в электронной промышленности в процессах, которые сопровождаются выбросами, в том числе: производство

микроэлектромеханических систем (МЭМС)¹⁸ и накопителей на жёстких магнитных дисках, тестирование оборудования (жидкие ФС), пайка оплавлением припоя в паровой фазе,¹⁹ и прецизионная чистка.²⁰

6.2.5 Разработка согласованного временного ряда

Применение ФС в полупроводниковой промышленности началось в конце 1970-х и особенно интенсивно стало развиваться с начала 1990-х годов. Определение уровня выбросов базового года может представлять некоторую трудность, поскольку имеется лишь немного сведений о выбросах до 1995 года. Если исторические оценки выбросов были основаны на простых предположениях (например, о том, что выбросы были на том же уровне), то такие оценки можно уточнить, применив методы, описанные выше. Если нет исторических данных, позволяющих использовать метод уровня 2 или 3, то можно ретроспективно применить метод уровня 1 с параметрами выбросов по умолчанию. Оба уровня (1 и 2) можно применить одновременно для тех лет, для которых появляются новые данные, позволяющие проводить сравнение или установить базовый уровень. Это следует делать в соответствии с руководством, представленном в главе 5 тома 1.

Для того чтобы обеспечить согласованное ведение записей о выбросах во времени, составители кадастра должны пересчитать выбросы ФС за все те годы, когда менялись методы расчёта выбросов (например, если составитель кадастра переходит от значений по умолчанию к реальным заводским значениям). Если нет заводских данных за все годы временного ряда, то следует подумать, каким образом можно использовать текущие заводские измерения для пересчёта выбросов за эти годы. Допустимо применять текущие заводские параметры выбросов к данным о продажах за прошлые годы, при условии что работа завода не претерпела значительных изменений. Такой пересчёт необходим, чтобы убедиться в том, что возможные изменения в тенденциях выбросов реальные, а не ложные, связанные со сменой методики.

6.3 ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ

Применение метода уровня 3 даёт результат с наименьшей неопределённостью. В условиях ограниченного числа заводов и тщательного мониторинга производственных процессов на уровне завода сбор данных для методов уровня 2b или 3 – вполне выполнимая задача. Составители кадастра должны запрашивать значения неопределённостей в промышленных структурах, пользуясь советами по получению экспертных оценок, которые были даны в главе 3 тома 1.

Из всех методов метод уровня 1 наиболее неопределённый. Использование единственного коэффициента для расчёта выбросов ФС от всего многообразия полупроводниковых продуктов – это слишком сильное упрощение. Коэффициенты, представленные в таблице 6.2, довольно точно оценены по отношению к производству новейших изделий памяти и логики поколения поздних 1990-х годов, имеющих от 3 до 5 слоёв, соответственно, нанесённых на кремниевую пластину. Коэффициенты для стран, которые в сегодня выпускают продукты с использованием новейших технологий (и не применяют мер для снижения выбросов ФС) будут выше; в то же время страны, производящие продукты с использованием более старых технологий или производящие более простые изделия, будут применять такой же и даже более низкий коэффициент.

Коэффициенты выбросов уровня 1 для производства ТПТ-ППД представляют собой средневзвешенное значение оценочных усреднённых выбросов ПФУ на единицу площади стеклянных подложек, потреблённых при производстве ТПТ-ППД для тех стран, где эти данные известны (Burton, 2004b). Оценка выбросов для Японии, сделанная с использованием коэффициентов уровня 2b для производства полупроводников взятых из руководства *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2000) опубликована в (Nishida *et al.*, 2004). Метод оценки выбросов от производства ТПТ-ППД на Тайване не был опубликован (Leu *et al.*, 2004). Однако впоследствии Leu (2004) сообщил о том, что усреднённый коэффициент выбросов имеет тот же порядок, что и

¹⁸ Выбросы от производства микроэлектромеханических систем можно оценить с помощью методов аналогичных тем, что используются для других подсекторов электроники. Необходимо знать коэффициенты выбросов и эффективность снижения выбросов для отдельных компаний. Очень небольшие количества ФС также используются в научно-исследовательских лабораториях/предприятиях.

¹⁹ Выбросы от пайки с оплавлением в паровой фазе можно приравнивать к годовым нетто-закупкам ФС для технического обслуживания оборудования, предназначенного для пайки с оплавлением в паровой фазе.

²⁰ Выбросы от прецизионной чистки следует учитывать в разделе 7.2 (Растворители) этого тома.

коэффициент, который рассчитал Burton (2004b). Неопределенность коэффициента выбросов уровня 1 для производства ТПТ-ППД по-видимому велика, но в настоящее время не известна. Расчет выбросов по методу уровня 3 для полупроводников или ТПТ-ППД даёт более точные результаты, чем методы уровня 2a, 2b, или 1 - примерно $\pm 30\%$ (с 95%-ным доверительным интервалом). Неопределенность эффективности технологии очистки выбросов вносит наибольший вклад в эту неопределённость, особенно непостоянство времени использования оборудования для очистки выбросов и непостоянство скоростей потока через это оборудование, которые могут превышать проектные пределы.

Оценки выбросов от использования теплоносителей с помощью метода уровня 2 более точные, чем для метода уровня 1 - порядка $\pm 20\%$ (с 95%-ным доверительным интервалом).

6.3.1 Неопределённости коэффициентов выбросов

Неопределенности коэффициентов выбросов, предложенные для методов уровня 2a и 2b, представлены в таблице 6.9 (для производства полупроводников) и 6.10 (для производства ТПТ-ППД). Коэффициенты были разработаны специально для этого руководства. Для уровня 2b относительные ошибки для каждого элемента (процесса и газа в случае уровня 2b) были оценены как стандартное отклонение коэффициентов, представленных экспертной группой, нормализованное до простого (невзвешенного) среднего значения, округлённое до первой значащей цифры.¹² Оценка для каждого значения затем была удвоена с тем, чтобы оценить 95%-ный доверительный интервал. Та же процедура была использована для оценки относительных ошибок для коэффициентов образования продуктов (В). Оценки для метода уровня 2a были выведены исходя из оценок уровня 2b на основании данных по расходованию газа, которые применялись для вывода коэффициентов выбросов (см. раздел 6.2.2, уровень 2).

Коэффициенты выбросов уровня 1 будут иметь диапазон неопределённости, нижняя граница которого близка к нулю, а верхняя граница - к 200% (с 95%-ным доверительным интервалом) для производства полупроводников и ТПТ-ППД. Для производства ФЭЭ неопределённость не была оценена.

6.3.2 Неопределённости данных о деятельности

Потребление газа является мерой деятельности, необходимой для оценки выбросов при производстве полупроводников, ТПТ-ППД и ФЭЭ для методов 2a и 2b. Потребление газа можно измерить или оценить на основании данных о закупке газа, что требует знания h (количество неиспользованного газа, который вернулся поставщикам газа в транспортных контейнерах). Неопределенности потребления газа (с 95%-ным доверительным интервалом) и h , измеренные или оцененные экспертами, показаны в таблице 6.10 (Относительные ошибки (с 95%-ным доверительным интервалом)) для данных о деятельности для методов уровня 2a и 2b для производства полупроводников и ТПТ-ППД).

Для метода уровня 1 мерой деятельности является потребление подложек. Неопределенности данных о деятельности уровня 1 в основном обусловлены отсутствием данных в базах данных WFW и FPD. Оценка надёжности элементов, выведенных из данных WFW в таблице 6.7, равна $\pm 10\%$ (доверительный интервал 95%), что отражает ошибки вследствие отсутствия или некорректности элементов базы данных. Доверительный интервал 95% для использования мощностей за период 1991-200 год равен $\pm 12\%$ (т.е. от 70% использования до 94% использования). Соответствующие элементы для производства ТПТ-ППД и ФЭЭ считаются аналогичными элементам для производства полупроводников.

ТАБЛИЦА 6.9 ОЦЕНКИ ПО УМОЛЧАНИЮ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ОШИБОК (%) ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ВЫБРОСОВ ФС УРОВНЯ 2 ОТ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, ДОВЕРИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРВАЛ 95%*														
Технологический газ (i)	Парниковые газы с ПГП, утверждёнными в Третьем докладе об оценке МГЭИК							Парниковые газы, ПГП которых не представлены в Третьем докладе об оценке МГЭИК			Непарниковые газы, дающие побочные продукты - ФС			
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	и-C ₄ F ₈	Удалённый NF ₃	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₄ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Уровень 2а														
1-U _i	15	30	100	400	20	80	400	70	300	300	80 [†]	40	НД	НД
V _{CF₄}	НД	90	300	200	60	100	200	200	НД	200	100 [†]	80	200	200
V _{C₂F₆}	НД	НД	НД	НД	НД	200	НД	НД	НД	200	200	НД	НД	НД
V _{C₃F₈}	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	40	НД	НД
Уровень 2б														
Травл. 1-U _i , травл.	60	100	100	700	НД	200	НД	300	300	300	200 [†]	НД	НД	НД
1-U _i , ХОПФ	10	30	НД	НД	0.4	30	400	70	НД	НД	30 [†]	40	НД	НД
V _{CF₄} , травл	НД	200	300	200	НД	200	НД	НД	НД	200	200 [†]	НД	НД	НД
V _{C₂F₆} , травл	НД	НД	НД	НД	НД	200	НД	НД	НД	200	200 [†]	НД	НД	НД
V _{CF₄} , ХОПФ	НД	80	НД	НД	60	60	200	200	НД	НД	60 [†]	80	200	200
V _{C₂F₆} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C₃F₈} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	40	НД	НД

Примечания: НД – нет данных; означает что в настоящее не применимо из-за отсутствия информации.
* Значения, которые выше 100% означают, что распределение стремится вниз к нулю и вверх к указанному значению.
[†] Оценка сделана по аналогии с и-C₄F₈, поскольку данные, имеющиеся для C₅F₈, недостаточны для оценки доверительного интервала.

ТАБЛИЦА 6.10
Оценки по умолчанию относительных ошибок (%) для коэффициента выбросов ФС уровня 2 от производства LCD, доверительный интервал 95%

Технологический газ (i)	Парниковые газы с ПГП, утверждёнными в Третьем докладе об оценке МГЭИК								Парниковые газы, ПГП которых не представлены в Третьем докладе об оценке МГЭИК			Непарниковые газы, дающие побочные продукты - ФС		
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	и-C ₄ F ₈	Удалённый NF ₃	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₄ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Уровень 2а														
1-Ui	50	НД	8	НД	НД	5	70	20	20	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CF4}	НД	НД	30	НД	НД	40	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CHF3}	НД	НД	НД	НД	НД	20	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C2F6}	НД	НД	40	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
Уровень 2б														
1-U _i , травл.	50	100	8	НД	НД	5	НД	60	НД	НД	НД	НД	НД	НД
1-U _i , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	70	20	6	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CF4} , травл.	НД	НД	30	НД	НД	40	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CHF3} , травл.	НД	НД	НД	НД	НД	20	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C2F6} , травл.	НД	НД	40	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{CF4} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C2F6} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД
V _{C3F8} , ХОПФ	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД	НД

Примечание: НД – нет данных; означает что в настоящее не применимо из-за отсутствия информации.

6.4 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА/КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА (ОК/КК), ОТЧЁТНОСТЬ И ДОКУМЕНТАЦИЯ

6.4.1 Обеспечение качества/контроль качества (ОК/КК)

В *эффективной практике* проверку контроля качества проводят на основании требований, изложенных в главе 6 тома 1, и мнения экспертов о полученных оценках выбросов. Дополнительная проверка контроля качества, согласно описанию в томе 1, и процедур по обеспечению качества также могут быть применены, особенно если для определения выбросов в этой категории источников используются методы более высокого уровня. Для *ключевых категорий* рекомендуется использовать самый высокий уровень ОК/КК, согласно определению в главе 4 тома 1.

Дополнительное общее руководство для процедур ОК/КК высокого уровня имеется также в главе 6 тома 1. Поскольку для полупроводниковой отрасли характерна высокая конкуренция, проверка достоверности должна сопровождаться мерами по охране конфиденциальности коммерческой информации. Следует задокументировать используемые методы расчёта и предусмотреть периодический аудит измерений и расчёта данных. Следует также рассматривать аудит ОК процессов и процедур.

6.4.2 Отчетность и документация

Следует проявить особую осторожность, чтобы не включить выбросы ГФУ, использованных в качестве заместителей ОРВ, в выбросы ГФУ, использованных при производстве полупроводников. *Эффективная практика* предусматривает документирование и архивирование всей информации, необходимой для проведения кадастровых оценок национальных выбросов в соответствии с инструкцией в разделе 6.11 тома 1. Нецелесообразно включать всю документацию в национальный кадастровый отчёт. При этом кадастр должен включать резюме используемых методов и ссылки на источники данных в таком виде, чтобы оценки выбросов были прозрачными и можно было воспроизвести все расчеты.

Развёрнутая отчётность по выбросам в этой отрасли промышленности будет способствовать повышению прозрачности и сравнимости выбросов. Поскольку эта отрасль выбрасывает в атмосферу несколько ФС газов, то отчётность по каждому газу (а не по химическому типу) также будет способствовать повышению прозрачности и применимости этих данных. Меры по повышению прозрачности должны учитывать конфиденциальность коммерческой информации об использовании отдельных газов. Группирование данных о выбросах отдельных газов на уровне страны должно обеспечить защиту такой информации в тех странах, где имеется три и более производителей. В таблице 6.11 (Информация необходимая для полной прозрачности оценок выбросов от электронной промышленности) представлена дополнительная информация для обеспечения полной прозрачности отчётности об оценках выбросов.

Эффективная практика для уровня 3 заключается в документировании способа получения коэффициентов выбросов для компаний и в объяснении их возможного отклонения от типовых значений по умолчанию. Учитывая требования по защите конфиденциальности, составители кадастра могут сгруппировать эту информацию для нескольких производителей. В случае, если производители в стране сообщают разные коэффициенты выбросов или переводные коэффициенты для конкретных ФС и процессов или типов процессов, то составители кадастра могут представить несколько коэффициентов, которые использовались в расчёте и отражены в отчёте.

ТАБЛИЦА 6.11 ИНФОРМАЦИЯ НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ОЦЕНОК ВЫБРОСОВ ОТ ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ				
Данные	Уровень 1	Уровень 2a	Уровень 2b	Уровень 3
Суммарная площадь поверхности обработанных электронных подложек (например, м ² кремния, м ² стекла)	X			
Использование мощностей для производства полупроводников, ТПТ-ППД и ФЭЭ	X			
Доля производства ФЭЭ с использованием ФС газов	X			
Выбросы каждого ФС (не сгруппированные по всем ФС)		X	X	X
Продажа/покупка каждого ФС		X		
Масса каждого ФС, использованного в каждом процессе или типе процесса			X	X
Доля каждого ФС, использованного в процессах с применением технологий очистки выбросов		X	X	X
Рабочий расход каждого ФС в каждом процессе или типе процесса (эта и последующая информация необходима, только если значение по умолчанию не используется)				X
Доля каждого ФС, превратившегося в SF ₄ в каждом процессе или типе процесса				X
Доля газа, остающаяся в транспортном контейнере				X
Доля каждого ФС, разрушенного с помощью технологии очистки выбросов				X
Доля побочного продукта ФС, разрушенного с помощью технологии очистки выбросов				X

Ссылки

- Agnostinelli, G., Dekkers, H. F. W., DeWolf, S. and Beaucarne, G. (2004). “Dry Etching and Texturing Processes for Crystalline Silicon Solar Cells: Sustainability for Mass Production”, presented at the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 2004.
- Alsema, E. A., Bauman, A. E., Hill, R. and Patterson, M. H. (1997) “Health, Safety and Environmental Issues in Thin Film Manufacturing”, 14th European ФЭЭ Solar Energy Conference, Barcelona, Spain. 1997.
- Burton, C. S. (2004a). “Uses and Air Emissions of Liquid PFC Heat Transfer Fluids from the Electronics Sector: Initial Findings”, report prepared for U. S. EPA’s Climate Change Division, October 2004.
- Burton, C. S. (2004b). “PFC Uses, Emissions, and Trends in FPD Manufacture: An Update”, draft report prepared for U. S. EPA’s Climate Change Division, June 2004.
- Burton, C. S. (2006). “Sources and Methods Used to Develop PFC Emission Factors from the Electronics Sector”, report prepared for U. S. EPA’s Climate Change Division, February 2006.
- Cowles, D. (1999) “Oxide Etch Tool Emissions Comparison for C5F8 and C4F8 Process Recipes”, presented at A Partnership for PFC Emissions Reductions, SEMICON Southwest 99, Austin, TX. October 1999.
- Fthenakis, V. (2005) Personal communication to S. Bartos on 5 February 2005 of data таблиц quantifying historical and current CF₄ and C₂F₆ usage in ФЭЭ manufacture for U. S. and Europe.
- Fthenakis, V. (2006) Personal communication to S. Burton and S. Bartos explaining proposal to begin monitoring FC emissions from European ФЭЭ industry. Feb. 6, 2006.
- IEA (2004). ‘Trends in Photovoltaic Applications: Survey report of selected IEA Countries between 1992 – 2003’, Photovoltaic Power Systems Programme (ФЭЭ PS), International Energy Agency, Report IEA-ФЭЭ PS T1-13:2004, September 2004.
- IPCC (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanuel S., Buendia L., Hoppaus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K., Tanabe K. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA/IGES, Нагасаки, Япония.
- ITRS (2004), “International Technology Roadmap for Semiconductors” available at <http://public.itrs.net/report.htm>
- Kim, D-H., (2006) 9 January 2006 Personal communication to Hideki Nishida identifying the historical average (50:50) proportion of SF₆ usage for etching and ХОПФ chamber-cleaning in Japanese, Korean and Taiwan TFT-PPD manufacture.
- Leu, C-H., (2004) “SF₆ Abatement Strategy in Taiwan”, presented at SF₆ Power Reduction Partnership for Electric Power Systems, Scottsdale, Az., 1-3 December 2004.
- Leu, C-H *et al.* (2004) “PFC emissions Abatement for TFT-LCD Industry in Taiwan”, available in the Proceedings of the 15th Annual Earth Technology Forum, Washington, D. C., 13-15 April 2004.
- Maycock, P. (2005) “ФЭЭ market update: global ФЭЭ production continues to increase”, Renewable Energy World, Vol. 8 (4), pp 86-99.
- Meyers, J., Maroulis, P., Reagan, B. and Green, D. (2001). “Guidelines for Environmental Characterization of Semiconductor Equipment”, Technology Transfer #01104197A-XFR, pub. International SEMATECH, Austin, Texas, USA. December 2004, See: www.sematech.org/docubase/document/4197axfr.pdf.
- Nishida, H. *et al.* (2004) “Voluntary PFC Emission Reduction in the LCD Industry”, available in the Proceedings of the 15th Annual Earth Technology Forum, Washington, D. C., 13 – 15 April 2004.
- Nishida, H., Marsumura, K., Kurokawa, H., Hoshino, A. and Masui, S. (2005), “PFC emission-reduction strategy for the LCD industry”, J. Society for Information Display, Vol 13, pp. 841-848 (2005).
- Nishida, H. (2006). 7 January 2006 Personal communication to D-H. Kim confirming historical average 50:50 proportion of SF₆ usage for etching and ХОПФ chamber-cleaning in Japan, Korean and Taiwan TFT-PPD manufacture.
- Phylipsen, G. J. M. and Alsema, E. A., (1995) “Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules”, report prepared for Netherlands Agency for Energy and the Environment, Report No. 95057, September 1995.

- Rentsch, J., Schetter C., Schlemm H., Roth, K. and Preu, R. (2005). "Industrialization of Dry Phosphorous Silicate Glass Etching and Edge Isolation for Crystalline Silicon Solar Cells", Presented at the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona, Spain. 6-10 June, 2005.
- Sekiya, A. (2003). "Climate-Friendly Alternative Refrigerant and the Others: New Evaluations for sustainability", The Earth Technologies Forum, Washington, D. C., 23 April, 2003.
- Shah, A., Meier, J., Buechel, A., Kroll, U., Steinhauser, J., Meillaud, F. and Schade, H. (2004). "Toward Very Low-Cost Mass Production of Thin-film silicon Photovoltaic (ФЭЭ) Solar Modules on Glass", presented at ICCG5 Conference in Saarbrucken, Germany, July 2004.
- SIA (2000). "Equipment Environmental Characterisation Guidelines", Revision 3.0, Semiconductor Industry Association (SIA), San Jose, California, USA, February 2000
- Strategic Marketing Associates (2004a). WORLD FAB WATCH: The Industry's Encyclopedia of Wafer Fabs Since 1994, January 2004 Edition.
- Strategic Marketing Associates (2004b). WORLD FAB WATCH: The Industry's Encyclopedia of Wafer Fabs Since 1994, October 2004 Edition.
- Tuma, P.E. and Tousignant, L. (2001). "Reducing Emissions of PFC Heat Transfer Fluids," Presented at Semicon West, San Francisco, July 2001.
- U.S. EPA (2005). U.S. Environmental Protection Agency, Inventory of U.S. Greenhouse Gas and Sinks: 1990-2003, EPA 430-R-05-003, April 2005.