

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ОТ ВНЕШНИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

А.В.Маркин
(АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», г. Зеленоград),
В.В. Веденеев,
А.И. Решмин,
С.Х. Тепловодский,
Ю.С. Зайко,
В.В. Трифонов
(МГУ им.М.В. Ломоносова)

Разработана технология формирования затопленных струй воздуха¹ круглого поперечного сечения, остающихся однонаправленными на длине, равной 5–6-ти диаметрам струи, при достаточно больших числах Рейнольдса (~2000–13000). Показана эффективность защиты объектов микроэлектроники, находящихся в подобных струях, от воздействия окружающей среды. Разработанная технология может быть использована для создания локальных чистых зон, не ограниченных твёрдыми стенками, в производстве микроэлектроники.

Одним из ключевых параметров планарной технологии, лежащей в основе микроэлектроники, являются топологические размеры элементов, которые по мере развития технологии уменьшаются и в настоящее время достигают величины 7 нм [1]. Уменьшение топологических размеров элементов диктует ужесточение требований к максимальным размерам² и допустимой концентрации на поверхности подложки механических включений, фатально поражающих микросхему. Характер поражений может быть связан как с изменением топологического рисунка, так и с нарушением электрофизических характеристик р-п переходов и областей/элементов структуры интегральной микросхемы.

Динамика критических размеров частиц и требуемых классов чистоты чистых производственных помещений (ЧПП), в зависимости от уменьшения топологических размеров по ITRS [2], приведена в табл. 1.

¹ Струя вещества (например, воздуха) называется затопленной, если распространяется в таком же веществе (воздухе).

² В ITRS (International Road Map for Semiconductor) принят термин CPS (Critical Particle Size) – «критический размер частицы». Как правило, в последних поколениях ITRS за величину CPS принимают от 1/2 до 2/3 минимального размера из правил проектирования. При этом, по мнению авторов ITRS, CPS не следует отождествлять с размером «частицы-убийцы». Дорожная карта издается с 1999 года, обновляется каждый год и содержит информацию по всем аспектам развития производства интегральных схем (ИС) на кремниевых пластинах.

Требования эти настолько жесткие, что обеспечить их за счет чистоты всего объема окружающей среды чистого помещения становится очень дорого, и даже технически невозможно. Частичным решением этой проблемы стало внедрение технологий SMIF (*Standard Mechanical InterFace – Стандартный механический интерфейс*) и FOUP (*Front Opening Unified Pod – Унифицированный контейнер с открывающейся передней стенкой*), что позволило существенно снизить требования к классу чистоты ЧПП, но высокие требования к объемам, в которых производятся непосредственно технологические операции, хранится и перемещается продукция, сохранились – от 4 ИСО до 1 ИСО.

По мере усложнения технологии изготовления ИС также растет чувствительность процессов микро- и нанопроизводства к химическим загрязнениям воздушной среды. Такой тип химических загрязнений принято называть воздушными молекулярными загрязнениями (ВМЗ) (в зарубежной литературе – *AMC – Airborne Molecular Contamination*). Даже незначительная концентрация химических веществ в объеме проведения технологических операций и на поверхности продукции может приводить к фатальным последствиям. В табл. 2 показаны примеры таких воздействий.

Представление о допустимом уровне ВМЗ можно получить на примере требований к чистоте

Таблица 1

Динамика критических размеров частиц и требуемых классов чистоты ЧПП в зависимости от уменьшения топологических размеров по ITRS

Годы	2000	2003	2006	2009	2012	2013	2014	2016	2018	2020	2022	2023
Минимальные топологические размеры ¹⁾ , нм	115	90	70	52	36	32	28	22,5	17,9	14,2	11,3	10
Размер ²⁾ поражающей частицы, нм	57,5	45	35	26	22,5	20	17,9	14,2	11,3	8,9	7,1	6,3
Класс чистоты ЧПП ³⁾	4 ИСО	5 ИСО	5 ИСО	6 ИСО	6 ИСО	6 ИСО	7 ИСО	7 ИСО	7 ИСО	7 ИСО	7 ИСО	7 ИСО
Класс чистоты в рабочей зоне ³⁾	3 ИСО	2 ИСО	2 ИСО	1 ИСО	1 ИСО	1 ИСО	1 ИСО	1 ИСО	1 ИСО	1 ИСО	1 ИСО	1 ИСО

Примечания.

¹⁾ Для DRAM $\frac{1}{2}$ Pitch половина шага для топологии динамической памяти.

²⁾ Под размером частицы здесь будем понимать диаметр сферы, обладающей такой же эффективной площадью рассеивания потока энергии, падающего на сферу, как и рассматриваемая частица.

³⁾ Класс чистоты задается счетной концентрации частиц в объеме по ГОСТ Р ИСО 14644-1[3].

⁴⁾ До 2012 года минимальный размер поражающей частицы выбирался равным $1/2$ величины минимального топологического размера, после 2012 года – равным $2/3$.

⁵⁾ С 2003 года повсеместное внедрение SMIF технологии.

Таблица 2

Примеры воздействия ВМЗ на продукцию

Тип ВМЗ	Производимый эффект
Кислотные радикалы (анимоны) F^- Cl^- CH_3COO^- Br , PO_4 , SO_4	Коррозия металла Дефектность в фоторезисте Осаждение солей кислот на линзах, фотошаблонах, кремниевых пластнах
Основания NH_3 Амины Мочевина	DUV фоторезист Т-верхушки вследствие влияния на фоторезист NH_3 и аминов Осаждение солей. Процесс особенно активизируется при фотолитографии с лучем с длиной волны 193 нм
Щелочные металлы Na , K , Mg , Ca	Удержание накопленного заряда Утечка в подзатворном диэлектрике
Металлы Ni , Fe , Co , Cu	Деградация целостности подзатворного диэлектрика (GOI)
Легирующие примеси Al , P , In , Ga , Ge , As , B , P	Создание состояний на границе раздела
Органика	Нарушение целостности подзатворного окисла Высокое сопротивление контактов Осаждение на поверхности линз и их деградация Ошибки при измерении параметров окисла

окружающей среды для процессов фотолитографии с использованием луча с длиной волны 248 нм (см. табл. 3). По мере уменьшения линейных размеров и перехода на установки фотолитографии с меньшими длинами волн луча, эти требования только ужесточаются вплоть до уровня десятков ppt [4].

Таким образом, по современным воззрениям общее направление обеспечения необходимого уровня чистоты в микро- и нанoeлектронном производстве заключается в создании минимального достаточного уровня чистоты воздушной среды в ЧПП и максимально необходимого, соответствующего технологическим требованиям, уровня

Таблица 3

Требования к чистоте воздушной среды для процессов фотолитографии с использованием луча с длиной волны 248 нм

Тип воздушных молекулярных загрязнений ВМЗ	Уровень ВМЗ, ppb, не более (Устанавливается в соответствие с требованиями технологии и продукции для ЧПП высоких классов чистоты)
Летучие основания	50
Из них NH ₃	25
Летучие кислоты	5,0
Из них SO ₂	0,3
Конденсируемая органика	50
Неконденсируемая органика	1000
Легирующие добавки	0,1
Фосфоро-, металло-, кремне-, сера-органические соединения (<i>refractory compounds</i>)	0,1

чистоты непосредственно в объеме проведения технологических операций и при обращении с продукцией [5].

Основной принцип обеспечения чистоты в операционном объеме заключается в отделении этого объема барьером от окружающего пространства и организации подачи в этот объем большого количества очищенного воздуха для купирования загрязнений, которые могут генерироваться в процессе использования этого объема для выполнения операций или хранения продукции. Основное назначение барьера – не впускать внутрь защищаемого объема посторонние загрязнения, как аэрозоли, так и химические соединения. При этом барьер может быть как чисто механический, так и образованный за счет физических свойств воздуха.

Механический барьер обладает высокой эффективностью и надежностью. В основном, данный метод применяется для создания особых условий внутри технологического оборудования. Доступ в защищаемый объем осуществляется через стандартные механические интерфейсы, исключающие возможность попадания загрязнений внутрь, при помещении извне продукции в объем операционной зоны. Установка внутри этого объема роботов оправдана, так как обрабатываются в основном стандартные продукты (как правило, полупроводниковые пластины определенных размеров). Для выполнения ряда операций применяются так называемые «перчаточные боксы» и «полускафандры» [6], в которых продукция также механически отделена от среды чистого помещения, а манипуляции осуществляет оператор, находящийся за механическим барьером.

Недостатком подобных устройств является их малая пригодность для проведения уникальных технологических операций, которые требуют универсализма человеческих рук и высокого уровня тактильной чувствительности. К таким операциям можно отнести: формирование (загрузка подложек в SMIF-контейнер) технологических партий, неавтоматизированный контроль электрофизических параметров структуры интегральной схемы и технологических слоев, подготовка проб для аналитики, ответственные сборочные операции и др.

Для обеспечения условий при проведении подобных операций применяются устройства, принцип действия которых основан на создании газодинамических барьеров.

Барьеры, основанные на физических свойствах воздуха, можно в общем виде разделить на 2 основных вида:

1. Перепад давления воздуха по обе стороны барьера высокий с превышением со стороны защищаемого объема, но масса переносимого воздуха невысока. Защита от попадания загрязнений внутрь объема происходит за счет высокой скорости выходящего потока. Как правило, этот метод применяется для защиты больших объемов, полная герметичность периметра которых затруднительна, и, более того, в процессе эксплуатации перманентно нарушается (наиболее наглядный пример – чистое помещение и/или встроенные в нем локальные чистые зоны). Данный метод практически не применяется при создании устройств, в которых производится обработка продукции.

2. Перепад давления воздуха по обе стороны барьера невысокий с превышением со стороны защищаемого объема, скорость вытекающего потока воздуха невысокая. Защита от попадания загрязнений внутрь осуществляется за счет большой массы вытекающего в единицу времени воздуха. Данный метод получил наибольшее применение в различных локальных чистых зонах – отдельных рабочих местах, в которых манипуляции с продукцией оператор осуществляет при открытой передней стенке. Можно сказать, что практически все производства микро- и нанoeлектроники используют рабочие места, принцип действия которых основан на данном методе.

Другая сторона описываемой проблемы заключается в следующем. В технологических процессах микро- и нанoeлектроники зачастую применяются или образуются в процессе химических реакций вещества, которые представляют собой угрозу здоровью персонала, качеству продукции, работоспособности технологического оборудования и оснастки и могут нанести ущерб инженерным и конструктивным элементам ЧПП. Эти вещества необходимо удалять и в дальнейшем утилизировать. Технически это осуществляется за счет организации, т.н. местных отсосов (вытяжной вентиляции). Вследствие этого возникает техническое противоречие: с одной стороны, необходимо в защищаемом объеме для организации барьера, препятствующего попаданию загрязнений снаружи, создать избыточное давление – воздух стремится наружу из объема, а, с другой стороны, необходимо удалять из объема вредные вещества, вследствие чего давление внутри защищаемого объема падает, и воздух снаружи стремится внутрь этого объема.

Для решения этой проблемы создано множество самых разнообразных устройств, конструкции которых, тем не менее, можно сгруппировать в три основных типа:

1. Барьер создается за счет баланса приточного и вытяжного воздуха (правило одной струи). Фактически это приточные системы, сконструированные таким образом, что весь подаваемый через фильтрационный модуль воздух проходит через внутренний защищаемый объем устройства и полностью удаляется вытяжной системой. Считается, что можно отрегулировать такую систему так, что и наружный воздух внутрь не попадет, и внутренний воздух наружу не выйдет. На практике, даже если такая регулировка удалась, чувствительность системы к флуктуациям внешних условий

(изменение внешнего давления воздуха, изменение эффективной площади барьера и т.п.) очень высока и при ее эксплуатации постоянно возникают проблемы.

2. Барьер создается за счет дополнительной плоской струи движущегося с большой скоростью воздуха, которая формируется непосредственно в открытой части периметра устройства. За счет разряжения давления воздуха в такой струе происходит захват и удаление загрязнений как извне, так и изнутри устройства. Высокий класс чистоты внутри устройства поддерживается второй системой (по типу 1).
3. Барьер создается за счет механического разделения подаваемого потока воздуха приспособлением типа козырька. Одна часть потока идет на поддержание чистоты внутри устройства, другая часть, не смешиваясь с воздухом защищаемого объема, служит барьером для проникновения наружного воздуха внутрь. Данный тип устройств также чувствителен к настройкам.

Предлагаемое решение

Одной из основных характеристик газовых струй является однородность струи в плоскости, перпендикулярной вектору скорости потока. Под однородностью понимают одинаковое направление вектора скорости потока в любой точке такого сечения. Потоки, у которых такая однородность высока, называются однонаправленными, у которых это требование не выполняется – неоднаправленными [7]. В технической литературе более распространены термины ламинарный и турбулентный поток, соответственно, и, хотя эти определения не являются строгими, в этой работе мы также будем придерживаться такой терминологии.

Устойчивость малых возмущений однонаправленной осесимметричной струи в невязкой постановке впервые изучена теоретически в [8]. Было доказано, что необходимым условием неустойчивости является существование максимума выражения

$$Q(r) = \frac{ru'}{n^2 + \alpha^2 r^2}$$

в некоторой точке потока [9]. Здесь n и α являются, соответственно, азимутальным и осевым волновыми числами возмущения, u – средняя скорость вдоль оси струи, r – радиальная координата. Показано, что для развитого профиля скорости струи $u = 1/(1+r^2)^2$ растущими являются только синусоидальные моды ($n = 1$). Авторы статьи [8]

исследовали влияние условий на срезе сопла на структуру и устойчивость круглой затопленной струи и предложили способ увеличения длины ламинарного участка.

Длина ламинарного участка струи определяется характеристиками потока на выходе в открытое пространство: профилем скорости и интенсивностью турбулентности. Существует несколько методов создания потоков с низкой интенсивностью турбулентности в каналах.

Одним из наиболее распространённых способов формирования круглых ламинарных струй является использование длинных подготовительных трубок [10, 11, 12]. Если степень турбулентности в подаваемом в трубу потоке достаточно мала, то переход к турбулентности в трубе не происходит. Профиль скорости на выходе из трубы определяется её длиной и числом Рейнольдса (далее везде для струй круглого поперечного сечения приводятся числа Рейнольдса, рассчитанные по диаметру выходного отверстия и средней по сечению скорости струи). Длина l участка трубы, на котором сформируется профиль, отличающийся от параболического не более, чем на 5%, связана с числом Рейнольдса Re и диаметром трубы d соотношением $l = 0,03 \cdot dRe$. Для того чтобы при числах Рейнольдса около 10000 создать таким способом ламинарный поток в трубе диаметром 0,1 м, имеющий параболический профиль скорости, потребовалась бы труба длиной в десятки метров.

Требуемый профиль скорости с низкой интенсивностью турбулентности также может быть сформирован посредством сот (honecombs). Этот способ применялся авторами [13] при исследовании течения соосных струй. Для формирования профиля скорости внутренней струи они использовали соты из трубок различной длины диаметром 1 мм с толщиной стенки 0,05 мм. На выходе из формирующего устройства устанавливались металлические сетки, за которыми относительные пульсации в струе были ниже 1%. Были получены ламинарные струи диаметром 0,028 м длиной 20 диаметров при $Re = 1300$ и 9 диаметров при $Re = 2700$. Указанный метод является эффективным, однако изготовление сот, состоящих из тонкостенных трубок малого диаметра, достаточно трудоёмко.

В данной статье для уменьшения уровня турбулентных пульсаций в потоке описан метод, когда поток выравнивается разбивающими вихри решётками и ламинаризуется, проходя через наборы мелкопористых сеток. Для формирования профиля скорости в начальном сечении струи

предлагается короткий, быстро расширяющийся диффузор, который, как будет показано далее, позволяет при небольшой длине канала создать профиль скорости, обеспечивающий достаточно длинный начальный ламинарный участок струи. Следует отметить, что оптимальность выбранного профиля скорости, по сравнению с другими возможными профилями, предстоит исследовать.

Техническая реализация

Экспериментальная установка состоит из устройства подачи воздуха (подающая трубка), формирующего устройства и измерительной системы. Фотография и схема формирующего устройства приведены на Рис. 1.

Воздух поступает в установку по магистрали (1). Первая секция формирующего устройства представляет собой цилиндрический канал длиной 0,15 м и диаметром 0,04 м. На входе в канал установлена равномерно перфорированная пластина (2) – гексагональная решетка с круглыми отверстиями диаметром 0,6 мм и отношением площади отверстий к площади пластины 0,8. Проходя через решетку, воздушный поток выравнивается, а крупномасштабные пульсации исчезают. На расстоянии 0,03 м от перфорированной пластины располагается втулка (3) длиной 0,05 м, на которой закреплены тканые мелкопористые сетки с ячейками 40 мкм (нити имеют диаметр 30 мкм и выполнены из нержавеющей стали). Вторая секция формирующего устройства – короткий диффузор (4) – находится на расстоянии 0,06 м от втулки. Отношение диаметров выходного и входного сечений диффузора равно 3. Длина канала диффузора составляет 1/3 диаметра выходного сечения, т.е. в диффузоре поток расширяется от диаметра 0,04 до 0,12 м на длине 0,04 м.

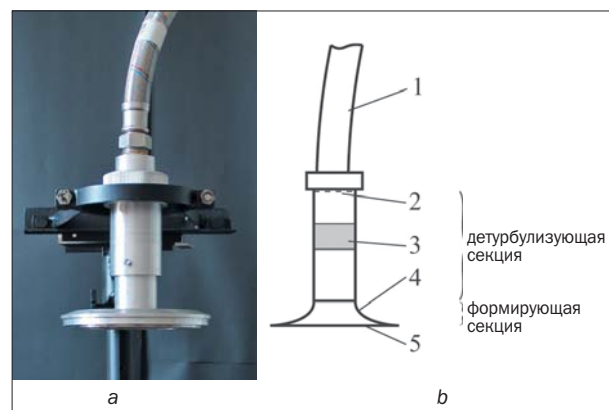


Рис. 1. Фото (а) и схема (б) формирующего устройства: подводящая трубка (1), перфорированная пластина (2), втулка с металлическими сетками (3), короткий диффузор (4), пакет сеток (5)

Измерения показывают, что поток после прохождения первой секции равномерный, интенсивность турбулентных пульсаций на выходе из первой и второй секций одинакова. В конфигурации I перед перфорированной пластиной помещалась плотная ткань. В этой конфигурации интенсивность турбулентных пульсаций в потоке на выходе составляет менее 0,6%. В конфигурации II ткань перед перфорированной пластиной не устанавливалась. В этом случае интенсивность турбулентных пульсаций – менее 0,8%.

В круглых расширяющихся каналах может реализовываться безотрывное течение, если угол раскрытия канала не превышает 12° – 14° . В случае больших углов раскрытия диффузора происходит отрыв потока, и турбулентные пульсации скорости становятся значительными. С учетом этого, для предотвращения отрыва потока канал диффузора специально спроектирован, а на выходе из него установлен плотный пакет из двух металлических тканых сеток (5): латунной (диаметр нити равен $0,05 \pm 0,004$ мм, просветность 34,4%) и нержавеющей стальной (диаметр нити $0,03 \pm 0,004$ мм, просветность 32,7%). Сетки тормозят поток и направляют его к стенке канала. В диапазоне расходов, для которого подобраны геометрия канала и сопротивление перегородки из сеток, течение внутри диффузора сохраняется ламинарным.

Для измерения поля скорости использовался термоанемометр DISA 56C01 СТА, сигнал с него передавался на аналого-цифровой преобразователь и обрабатывался. Скорость и турбулентные пульсации измерялись проволоочными датчиками малого размера Dantec Dynamics 55P11, закреплёнными на устройстве перемещения. Поток воздуха создавался с помощью калибровочной установки 55D41/42 измерительного комплекса DISA. При этом скорость потока определялась с помощью наклонного спиртового дифференциального манометра G 1634, измеряющего перепад давления между входом в сужающуюся часть сопла и измерительной областью. За счет разработанной методики калибровки датчика достигнутая погрешность измерения относительных пульсаций скорости на порядок меньше приведенных значений. Визуализация струи была выполнена с помощью светоотражающих частиц, лазера KLM-532 и видеокамеры.

Результаты

Измерения профилей скорости вдоль различных диаметров диффузора показали, что распределение скорости на выходе из него практически

симметрично относительно оси струи и зависит только от радиальной координаты r . На Рис. 2 представлены некоторые профили скорости (а) и относительных пульсаций скорости (б) на расстоянии $l = 5$ мм от выхода из формирующего устройства для различных скоростных режимов ($U_c = 0,5$ и $2,5$ м/с, где U_c – скорость на оси струи).

В первой серии экспериментов осевая скорость и ее пульсации измерялись на различных расстояниях от выхода из установки с шагом, равным D . Измерения при фиксированном скоростном режиме показали, что скорость и начальная интенсивность турбулентных пульсаций сохраняются на оси струи на расстоянии нескольких диаметров, а на определенном расстоянии, различном для разных скоростных режимов, от выхода из установки начинают изменяться (скорость падает, турбулентные пульсации растут). При обнаружении уменьшения скорости и роста пульсаций шаг уменьшался в два раза, делался отступ на новый шаг вверх по течению для более точного определения расстояния, на котором параметры струи начинают меняться.

Были проведены измерения скорости и пульсаций на оси струи для конфигураций I и II при различных скоростных режимах. Получено, что характеристики струи на оси для конфигураций I и II близки. Исходя из результатов измерений параметров струи на оси, можно предполагать, что струи с самым длинным ламинарным участком реализуются для данного формирующего устройства при скоростях, изменяющихся в диапазоне $U_c = 1,5$ – $2,5$ м/с.

Вторая серия экспериментов посвящена более подробному измерению длины ламинарного участка струи при скоростях U_c , равных 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5 м/с (числа Рейнольдса Re , соответственно, равны 2 000, 3 840, 5 680, 7 440, 9 200, 10 880, 12 560). $Re = \rho u_{av} D / \mu$, где $\rho = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха, u_{av} – средняя по площади поперечного сечения скорость, которая в данных экспериментах изменялась от 0,25 до 1,6 м/с, $D = 0,12$ м – выходной диаметр диффузора, $\mu = 1,79 \times 10^{-5}$ Па·с – динамический коэффициент вязкости воздуха. Профили скорости и турбулентных пульсаций в поперечных сечениях струи измерялись с шагом D вдоль её оси.

Для каждого скоростного режима найдено максимальное расстояние, отсчитываемое от выходного сечения установки, на котором скорость и турбулентные пульсации меняются незначительно (профиль скорости сохраняется, а турбулентные пульсации скорости остаются менее 1%). Далее это расстояние называется длиной ламинарного

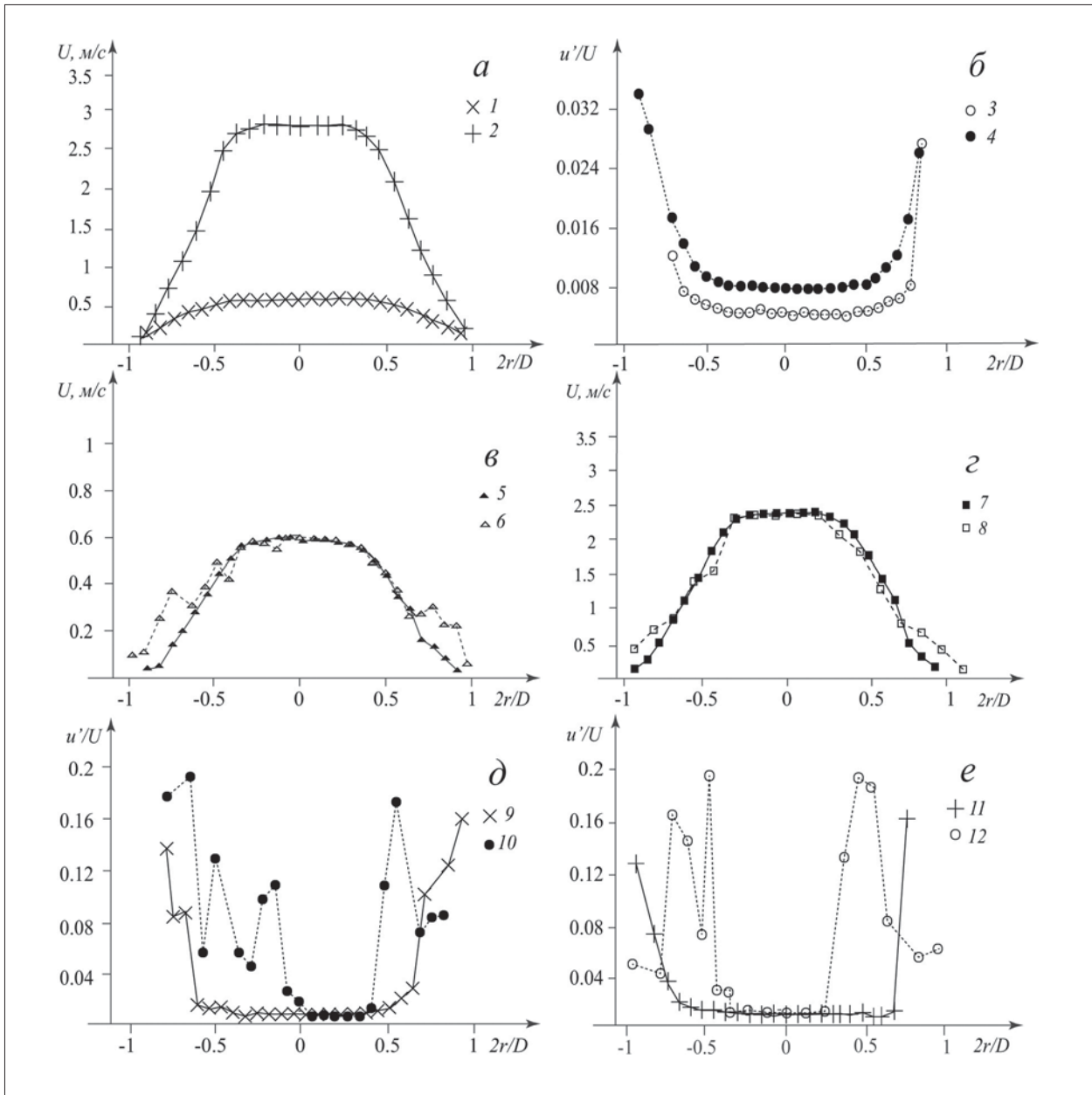


Рис. 2. Профили скорости U (а, в, г) и относительных пульсаций скорости u'/U (б, д, е) при $U_c = 0.5$ м/с (1, 4, 5, 6, 9, 10) и $U_c = 2.5$ м/с (2, 3, 7, 8, 11, 12) на различных расстояниях l от начала струи в случае конфигурации I: $l = 0.005$ м, (1 – 4), $l = l_{max} = 0.24$ м (5, 9), $l = l_{max} + D/2 = 0.36$ м (6, 10), $l = l_{max} = 0.66$ м (7, 11), $l = l_{max} + D/2 = 0.78$ м (8, 12)

участка струи. На Рис. 2 (в–д) для $U_c = 0,5$ и $2,5$ м/с представлены профили скорости и относительных турбулентных пульсаций на максимальной длине ламинарного участка l_{max} и на расстоянии $l_{max} + D/2$, где измерения обнаруживали начало перехода к турбулентности (относительные турбулентные пульсации на данном расстоянии возрастают по сравнению с начальными). Результаты второй серии экспериментов показали, что, во-первых, длина ламинарного участка струи максимальна при режимах, соответствующих скоростям $U_c = 2–2,5$ м/с, и равна $5,5D$ в случае конфигурации I; максимальна при скоростном режи-

ме $U_c \approx 2$ м/с и равна $5D$ для конфигурации II. Во-вторых, в силу меньшего начального уровня турбулентности, длина ламинарного участка струи в конфигурации I больше, либо равна длине ламинарного участка струи, полученной в конфигурации II. Эти выводы проиллюстрированы на Рис. 3.

Проведенные измерения показали, что начальная интенсивность относительных турбулентных пульсаций в сравнении с другими режимами выше для первых трех скоростных режимов. Были проведены предварительные численные исследования линейной задачи гидродинамической устойчивости. Согласно расчетам, причиной

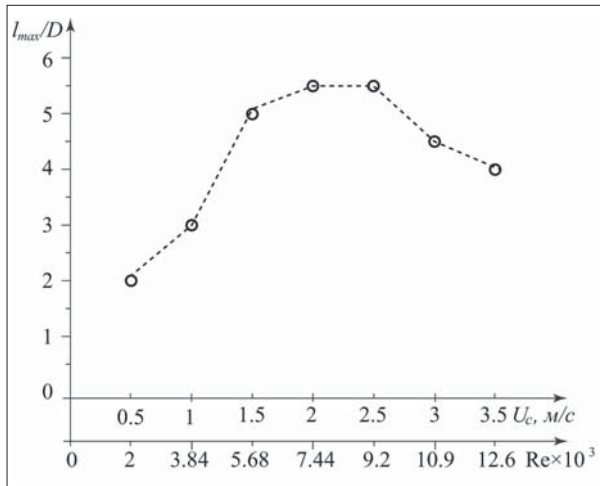


Рис. 3. Зависимость длины ламинарного участка затопленной струи I_{max} от скорости потока U_c на оси струи для конфигурации I (1) и II (2)

возникновения локального отрыва при увеличении скорости потока является слишком резкое увеличение диаметра канала диффузора в области перехода от цилиндрической части диффузора к расширению. Сглаживание этой части профиля канала и использование пакета сеток с большим коэффициентом сопротивления устраняют возникновение локального отрыва в исследуемой области параметров течения.

Третья серия экспериментов была посвящена визуализации струи. Из генератора аэрозоля (использовать который позволяет только конфигурация II) через гибкий шланг светоотражающие частицы поступали в подводящую трубку. Часть струи освещалась лазерным световым ножом, и камера, оптическая ось которой была перпендикулярна плоскости лазерного светового ножа, фиксировала движение частиц.

На Рис. 4 показано сравнение результатов визуализации затопленной струи с длинным ламинарным участком при $U_c = 1,8$ м/с (а) и струи, в которой переход к турбулентности происходит на расстоянии $\sim 1,5D$ (б).

Отметим основные преимущества предлагаемого метода создания барьера с двухсторонней непроницаемостью по сравнению с вышеперечисленными:

1. Предложенный метод обладает высокой эффективностью защиты (порядка 99%). Формирование каскадного барьера позволит существенно повысить эту эффективность вплоть до уровня 99,9%.
2. Формируемый за счет стационарной ламинарной струи барьер обладает высокой устойчивостью к изменениям параметров окружающей среды.

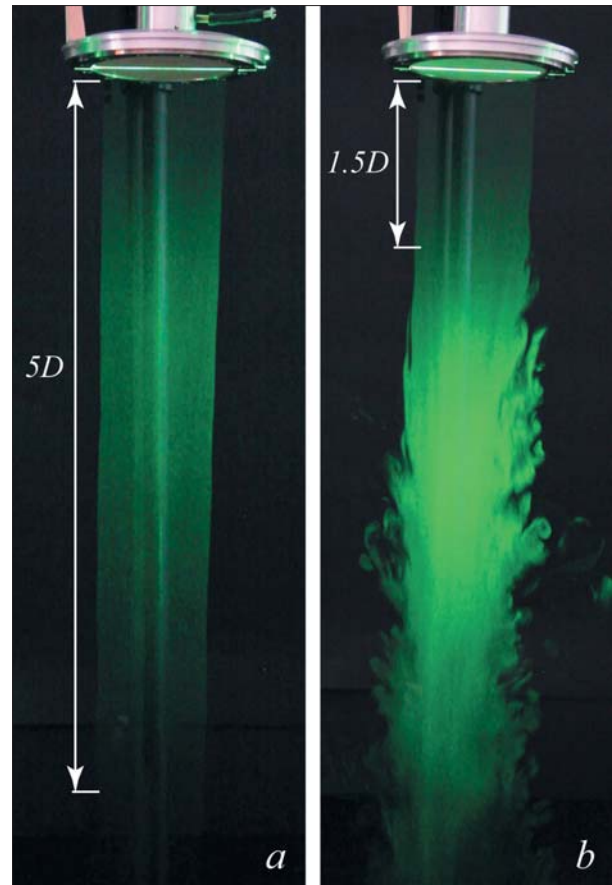


Рис. 4. Визуализация затопленной струи с длинным ламинарным (а) и переходным (б) участками в случае конфигурации II

3. Разработанное на основе предложенного метода техническое устройство формирования ламинарной струи воздуха, высокотехнологичное в плане изготовления и оснащения его автоматизированной системой поддержания параметров, легко может быть встроено как в локальные устройства обеспечения высокого класса чистоты рабочей среды, так и в грузочно-разгрузочные системы технологического оборудования.

Опытные образцы установок имеют диаметры ламинарных струй до $D=300$ мм, при этом ламинарность, т.е. несмешиваемость с окружающей средой, сохраняется на расстоянии до $6D$. Испытания устройств проводились в МГУ имени М.В. Ломоносова [14, 15] и включали тщательные аэродинамические измерения с помощью термоанемометрии, лазерной визуализации и панорамной диагностики потоков PIV, а также испытания эффективности с помощью модифицированного седиментационного метода, который показал эффективность установок не менее 98,2%.

Подана заявка на патент на изобретение №2018105755.05(008765).

Таблица 4

Возможные диапазоны характеристик чистой зоны, создаваемой установкой

Диаметр струи (чистой зоны) – D	до 0,8 м
Длина формирующего устройства	1,5 D
Длина ламинарного участка струи (чистой зоны)	до 6 D
Скорость на оси струи	от 0,1 до 5,0 м/с
Средняя скорость в струе	от 0,05 до 2,5 м/с
Эффективность защиты	до 99 %

Полученные результаты являются лишь первым шагом в создании технологии газодинамического формирования двухстороннего физического барьера. Следующий этап работы будет посвящен исследованию устойчивости полученной струи к перемещениям окружающей воздушной среды, изменениям ее температуры и влажности, а также к устойчивости образованного барьера к механическим интервенциям.

С точки зрения практического применения планируется разработка ряда единиц технологического оборудования, предназначенного как для применения в производстве, так и для лабораторных исследований. В табл. 4 приведены возможные диапазоны характеристик установки и чистой зоны, создаваемой установкой.

Список литературы

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника. Часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. 2017. Серия 3. Выпуск 1(165). С. 51-69.
2. ITRS (International Technologies Roadmap for Semiconductors) редакция 2015.
3. ГОСТ Р ИСО 14644-1-2000. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха.
4. ГОСТ Р ИСО 14644-8-2008. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 8. Классификация молекулярных загрязнений в воздухе.
5. В. Уайт. Технология чистых помещений // Клирум, Москва, 2002.
6. ГОСТ Р ИСО 14644-7-2007. Изолирующие устройства (укрытия с чистым воздухом), боксы перчаточные, изоляторы и миниокружения.
7. ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 4. Проектирование строительства и ввод в эксплуатацию.
8. Batchelor G.K., Gill A.E. Analysis of the stability of axisymmetric jets // J. Fluid Mech. 1962. V. 14. № 4. P. 529 – 551.
9. Rayleigh Lord. Scientific papers // Cambridge University Press, 1892. V. 3. P. 575.
10. Козлов Г.В., Грек Г.Р., Сорокин А.М., Литвиненко Ю.А.. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 1. P. 59 – 73.
11. Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Козлов Г.В., Вихорев В.В. Экспериментальное исследование затопленной круглой струи с вихрями Дина // Вестник НГУ. Серия физика. 2014. Т. 9. № 2. С. 128 – 135.
12. Леманов В.В., Терехов В.И., Шаров К.А., Шумейко А.А. Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // Письма в ЖТФ. 2013. V. 39. №9. P. 34 – 40.
13. Навознов О.И., Павельев А.А., Яценко А.В. О переходе к турбулентности в затопленных и спутных струях // Изв. АН СССР. МЖГ. 1972. № 4. P. 148 – 154.
14. Zayko J. et al. Formation of free round jets with long laminar regions at large Reynolds numbers // Physics of Fluids. – 2018. – Т. 30. – №. 4. – 043603.
15. Ю. С. Зайко, А. И. Решмин, С. Х. Тепловодский, А. Д. Чичерина. Исследование затопленных струй с увеличенной длиной начального ламинарного участка // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2018. – № 1. – С. 97–106. ■

Чистые Помещения и технологические среды

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**Архив
журнала
2002-2018**
Электронная версия

Уважаемые читатели!

Работа с электронным архивом журнала позволит сократить время на поиск важной информации, подбор материалов единой тематики и подготовку аналитических обзоров

Приобрести CD-диск

Вы можете через редакцию журнала и региональные подразделения Группы компаний ВИАЛЕК

