



УДК 621.01

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.637.646

# ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ОТ ВНЕШНИХ КОНТАМИНАЦИЙ

## GAS-DYNAMIC PROTECTION OF MICROELECTRONICS PROCESSES AND OBJECTS FROM EXTERNAL CONTAMINATION

ВЕДЕНЕЕВ ВАСИЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ<sup>1</sup>

*vasily@vedeneev.ru*

VEDENEYEV VASILY V.<sup>1</sup>

*vasily@vedeneev.ru*

РЕШМИН АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ<sup>1</sup>

RESHMIN ALEXANDER I.<sup>1</sup>

ТЕПЛОВОДСКИЙ СЕРГЕЙ ХАРИТОНОВИЧ<sup>1</sup>

TEPLOVODSKII SERGEY K.<sup>1</sup>

ЗАЙКО ЮЛИЯ СЕРГЕЕВНА<sup>1</sup>

ZAYKO JULIA S.<sup>1</sup>

ТРИФОНОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ<sup>1</sup>

TRIFONOV VLADIMIR V.<sup>1</sup>

МАРКИН АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ<sup>2</sup>

MARKIN ALEXANDER V.<sup>2</sup>

*almarkin@niime.ru*

*almarkin@niime.ru*

<sup>1</sup> Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

119192, г. Москва, Мичуринский просп., 1

<sup>2</sup>АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград,

1-й Западный проезд, 12, стр. 1

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University.

1 Michurinsky Ave., Moscow, 119192

<sup>2</sup> Molecular Electronics Research Institute JSC

bld. 1, 12 1st Zapadny Lane, Zelenograd,

Moscow, 124460, Russia

Разработана технология формирования затопленных струй воздуха круглого поперечного сечения, остающихся однонаправленными на длине, равной 5–6 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 твердыми стенками, в производстве микроэлектроники.

**Ключевые слова:** затопленная односторонняя струя; газодинамическая защита; воздушно-молекулярные загрязнения (ВМЗ); локальная чистая зона без механического барьера.

The paper considers the technology of forming the submerged air jets of circular cross-section remaining unidirectional at the distance equal to 5–6 diameters of the jet at sufficiently high Reynolds numbers (~2000–13000). The efficiency of protection of microelectronic objects in such jets from the environment impact has been shown. The technology developed can be used for creating local clean zones not bounded by rigid walls in microelectronics production.

**Keywords:** submerged unidirectional jet; gas-dynamic protection; air-molecular contamination (AMC); local clean zone without mechanical barrier.

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. Уменьшение топологических размеров элементов диктует ужесточение требований к максимальным размерам<sup>\*</sup> и допустимой концентрации на поверхности подложки механических включений, фатально поражающих микросхему. Характер пора-

жений может быть связан как с изменением топологического рисунка, так и с нарушением электрофизических характеристик р-п-переходов и областей/элементов структуры интегральной микросхемы. Необходимо отметить и такой аспект, связанный с аналитикой в микроэлектронике, как влияние вещества, из которого состоит частица аэрозоля, на чистоту анализируемой пробы. Например, возникшая вследствие попадания только одной частицы вещества размером 0,3 мкм с плотностью 5,0 г/см<sup>3</sup> в пробу и растворения в пробе воды массой 50 г (50 мл) примесь будет детектирована методом ионной хроматографии с LDL 10 ppt, что исказит результаты замеров.

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

\* В ITRS (International Road Map for Semiconductors) принят термин CPS (Critical Particle Size) — «критический размер частицы». Как правило, в последних генерациях ITRS за величину CPS принимают 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 ИС на кремниевых пластинах.



Таблица 1

Годы	2000	2003	2006	2009	2012	2013	2014	2016	2018	2020	2022	2023
Минимальные топологические размеры <sup>1</sup> , нм	115	90	70	52	36	32	28	22,5	17,9	14,2	11,3	10
Размер <sup>2</sup> 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 <sup>3</sup>	4ISO	5ISO	5ISO	6ISO	6ISO	6ISO	7ISO	7ISO	7ISO	7ISO	7ISO	7ISO
Класс чистоты в рабочей зоне <sup>4</sup>	3ISO	2ISO	2ISO	1ISO								

Примечания:

<sup>1</sup> Для DRAM  $\frac{1}{2}$  Pitch.

<sup>2</sup> Под размером частицы здесь будем понимать диаметр сферы, обладающей такой же эффективной площадью рассеивания потока энергии, падающей на сферу, как и рассматриваемая частица.

<sup>3</sup> Класс чистоты задается счетной концентрацией частиц в объеме по ГОСТ Р ИСО 14644-1.

<sup>4</sup> До 2012 года минимальный размер поражающей частицы выбирался равным  $1/2$  величины минимального топологического размера, после 2012 года — равным  $2/3$ .

<sup>5</sup> С 2003 года повсеместное внедрение SMIF-технологии.

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) и FOUP (Front Opening Unified Pod), что позволило существенно снизить требования к классу ЧПП, но высокие требования к объемам, в которых производятся непосредственно технологические операции, хранится и перемещается продукция, сохранились — от 4 ISO до 1 ISO [9].

По мере усложнения технологии изготовления ИС также растет чувствительность процессов микро- и нанопроизводства к химическим загрязнениям. Эти химические загрязнения принято называть молекулярными загрязнениями в воздухе — ВМЗ (в зарубежной литературе — Airborne Molecular Contamination — AMC). 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 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 [10].

Общее направление обеспечения необходимого уровня чистоты в микро- и наноэлектронном производстве, таким образом, по современным взглядам, заключается в создании минимального достаточного уровня чистоты в ЧПП и максимально необходимого, соответствующего технологическим требованиям уровня чистоты непосредственно в объеме проведения технологических операций и при обращении с продукцией.

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 выпускать внутрь защищаемого объема посторонние загрязнения — как аэрозоли, так

и химические соединения. При этом барьер может быть как чисто механическим так и образованным 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 оправданна, так как обрабатываются в основном стандартные продукты (как правило, полупроводниковые пластины определенных размеров). Для выполнения ряда операций применяются так называемые перчаточные боксы и полускафандры [8], в которых продукция также механически отделена от среды чистого помещения, а манипуляции осуществляют оператор, находящийся за механическим барьером.

Все эти перечисленные устройства зачастую оснащены собственными системами подготовки внутренней воздушной среды (кондиционеры, фильтровальные модули), которые позволяют «доводить» параметры воздуха окружающего чистого производственного помещения перед подачей внутрь устройства до заданных параметров (температура, влажность, класс чистоты). 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, подготовку проб для аналитики, ответственные сборочные операции и др.

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

Барьеры, основанные на физических свойствах воздуха, можно в общем виде разделить на два 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



Таблица 2

Тип ВМЗ	Производимый эффект
Кислоты $F^-$ $Cl^-$ $CH_3COO^-$ $Br, PO_4, SO_4$	Коррозия металла Дефектность в фотополимере Осаждение солей кислот на линзах, фотошаблонах, кремниевых пластинах
Основания $NH_3$ Амины Мочевина	DUV-фотополимер Т-верхушки вследствие влияния на фотополимер $NH_3$ и аминов. Осаждение солей. Процесс особенно активируется при фотолитографии с лучом с длиной волны 193 нм
Щелочи $Na, K, Mg, Ca$	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

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 постоянно нарушается (наиболее наглядный пример — чистое помещение и/или встроенные в нем локальные чистые зоны). Данный метод практически не применяется для создания 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



Таблица 3

Уровень молекулярных загрязнений воздуха $\text{ppb}$ , не более	Устанавливается в соответствии с требованиями технологии и продукции, для ЧПП высоких классов:
Летучие основания	50
Из них $\text{NH}_3$	25
Летучие кислоты	5,0
Из них $\text{SO}_2$	0,3
Конденсируемая органика	50
Неконденсируемая органика	1000
Легирующие добавки	0,1
Фосфоро-, металло-, кремне-, сераорганические соединения (refractory compounds)	0,1

стенке. Можно сказать, что практически все производства микро- и наноэлектроники используют рабочие места, принцип действия которых основан на данном методе.

Другая сторона описываемой проблемы заключается в следующем. В технологических процессах микро- и наноэлектроники 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 создано множество самых разнообразных устройств, конструкции которых, тем не менее, можно группировать в три основных типа.

1. Барьер создается за счет баланса приточного и вытяжного воздуха (правило одной струи). Фактически это прямоточные 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 колебаниям 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 I).

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 однодirectionalными, у которых это требование не выполняется — неоднодirectionalными [2]. В технической литературе более распространены термины «ламинарный» и «турбулентный поток» соответственно, в этой работе мы также будем придерживаться такой терминологии.

Часто встречающиеся в природе и технике турбулентные струи подробно изучаются на протяжении нескольких десятилетий множеством авторов в контексте различных приложений: перемешивание, горение, генерация звуковых возмущений [12–15]. Исследование течения ламинарных затопленных струй и процессов, сопровождающих развитие турбулентности в них, осложнено тем, что ламинарные струи при обычных условиях разрушаются в непосредственной близости от отверстия, из которого вытекают.

В [16] был впервые экспериментально исследован процесс перехода к турбулентности в ламинарных двумерных струях, вытекающих из узкого плоского канала. Было обнаружено, что струя становится неустойчивой при числах Рейнольдса около 10. В [17] приведено сравнение результатов экспериментальных измерений в зоне перехода к турбулентности двумерного слоя смешения и численного решения уравнения Рэлея, представлены некоторые общие характеристики перехода в двумерных течениях. Согласно [18, 19] значение критического числа Рейнольдса для двумерной автомодельной струи Бикли равно 4.

Устойчивость малых возмущений однодirectionalной осесимметричной струи в невязкой постановке впервые изучена теоретически в [20]. Было доказано, что необходимым условием неустойчивости является существование максимума выражения

$$Q(r) = \frac{ru'}{n^2 + \alpha^2 r^2} \quad (1)$$

в некоторой точке потока [21]. Здесь  $n$  и  $\alpha$  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 ( $n = 1$ ). Значение критического числа Рейнольдса  $Re_c$  для круглых осесимметричных струй составляет 37,9 [22]. Многочисленные более поздние статьи [23–25] посвящены управлению затопленными струями, подавлению турбулентности на свободных границах таких струй. В [26] исследовалось влияние условий на срезе сопла на структуру и устойчивость круглой затопленной струи, приведен способ увеличения длины ламинарного участка. Большой цикл статей [26–28] посвящен изучению влияния акустических возмущений на струю. Обширный обзор исследований по устойчивости дозвуковых струйных течений представлен в [25].



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. Пример установки для создания плоской ламинарной струи описан в [17].

Одним из наиболее распространенных способов формирования круглых ламинарных струй является использование длинных подготовительных трубок [26, 28, 29]. 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 ее 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 одного участка трубы, на котором сформируется профиль, отличающийся от параболического не более чем на 5%, связана с числом Рейнольдса  $Re$  и диаметром трубы  $d$  соотношением  $l = 0,03 \cdot d \cdot Re$ . В [26] струя диаметром 0,02 м с профилем Пузейля в начальном сечении при  $Re = 6667$  оставалась ламинарной на расстоянии 10 диаметров от выхода из трубы. При этом длина подготовительной трубы была в 200 раз больше ее диаметра. 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 (honeycombs). Этот способ применялся в [30] при исследовании течения соосных струй. Для формирования профиля скорости внутренней струи 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 трудоемко.

В данной статье для уменьшения уровня турбулентных пульсаций в потоке используется метод, когда поток выравнивается разбивающими вихри решетками 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

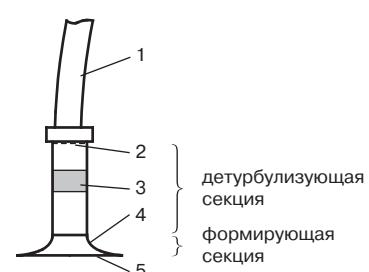
(2) — тексагональная решетка с круглыми отверстиями диаметром 0,6 мм и отношением площади отверстий к площади пластины 0,8. Проходя через решетку, воздушный поток выравнивается, а крупномасштабные пульсации исчезают. На расстоянии 0,03 м от перфорированной пластины располагается втулка (3) длиной 0,05 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) [31] 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. 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 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 CTA, сигнал с него передавался на аналогово-цифровой преобразователь и обрабатывался. Скорость и турбулентные пульсации измерялись проволочными датчиками малого размера Dantec Dynamics 55P11, закрепленными на устройстве перемещения. Длина нити датчика составляла 1,25 мм, а толщина — 5 мкм. Поток воздуха создавался с помощью калибровочной установки 55D41/42 измерительного комплекса DISA. При этом скорость потока определялась



а



б

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)



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 выполнена с помощью светоотражающих частиц, лазера KLM-532 и видеокамеры.

### Полученные 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 (*a*) и относительных пульсаций скорости (*b*) на расстоянии  $l = 5$  мм от выхода из формирующего устройства для различных скоростных режимов ( $U_c = 0,5$  и  $2,5$  м/с,  $U_c$  — скорость на оси струи).

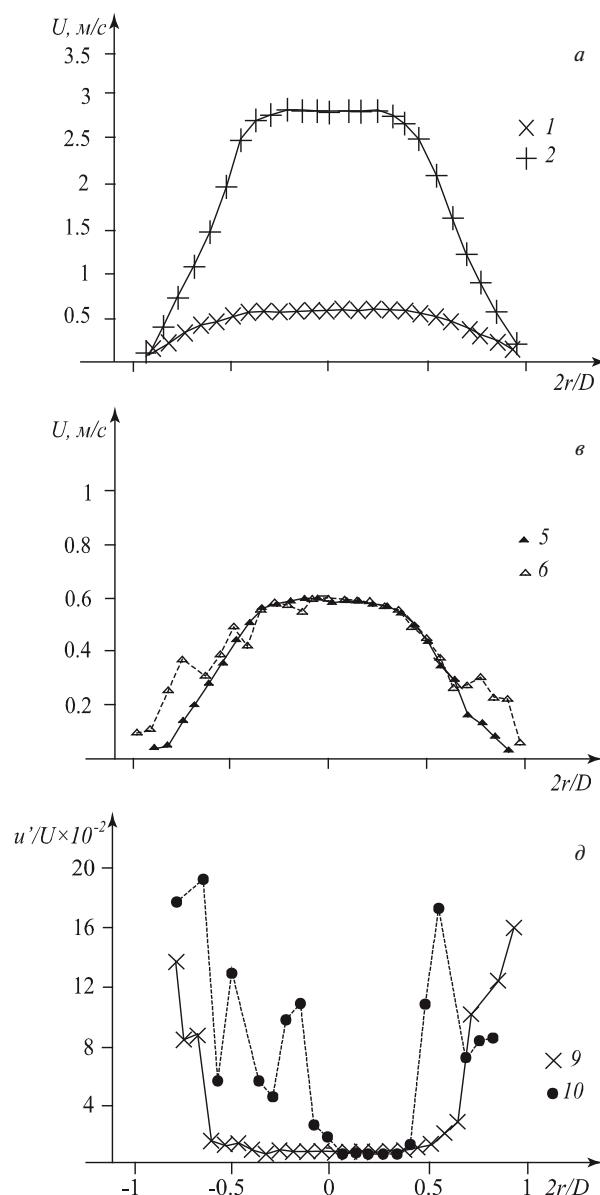
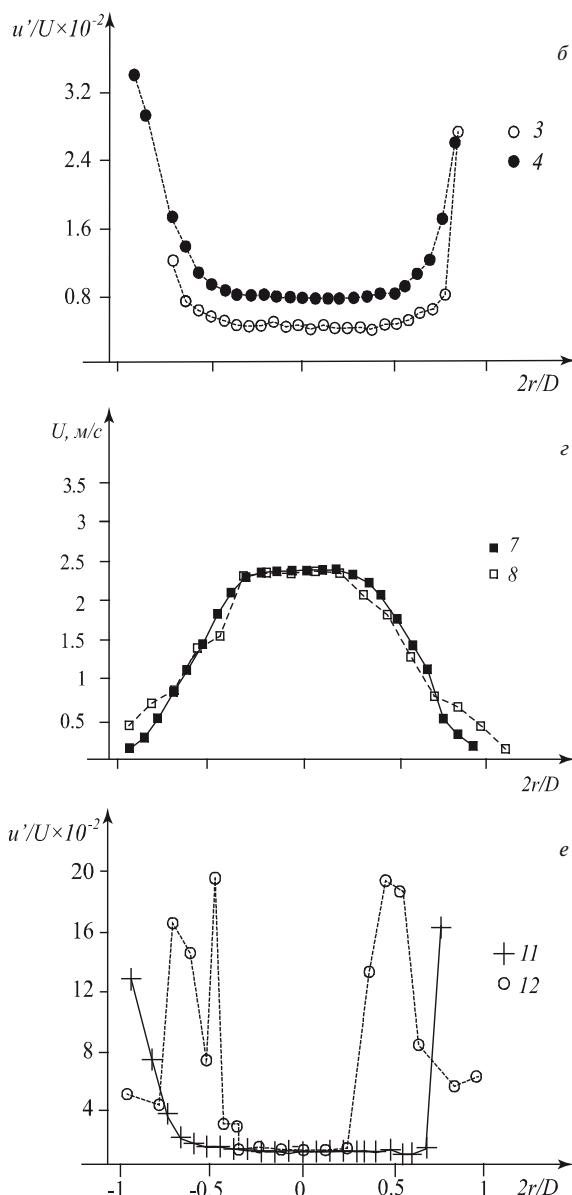


Рис. 2. Профили скорости  $U$  (*a*, *b*, *c*) и относительных пульсаций скорости  $u'/U$  (*b*, *d*, *e*) при  $U_c = 0,5$  м/с (1, 4, 5, 6, 9, 10) и  $U_c = 2,5$  м/с (2, 3, 7, 8, 11, 12) на различных расстояниях  $l$  от начала струи в случае конфигурации I:  $l = 0,005$  м, (1–4),  $l = l_{max} = 0,24$  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)

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 начинали меняться.

На рис. 3 представлены результаты измерений скорости и пульсаций на оси струи для конфигураций I и II при различных скоростных режимах. Получено, что характеристики струи на оси для конфигураций установки I и II близки. Исходя из результатов измерений параметров струи на оси можно



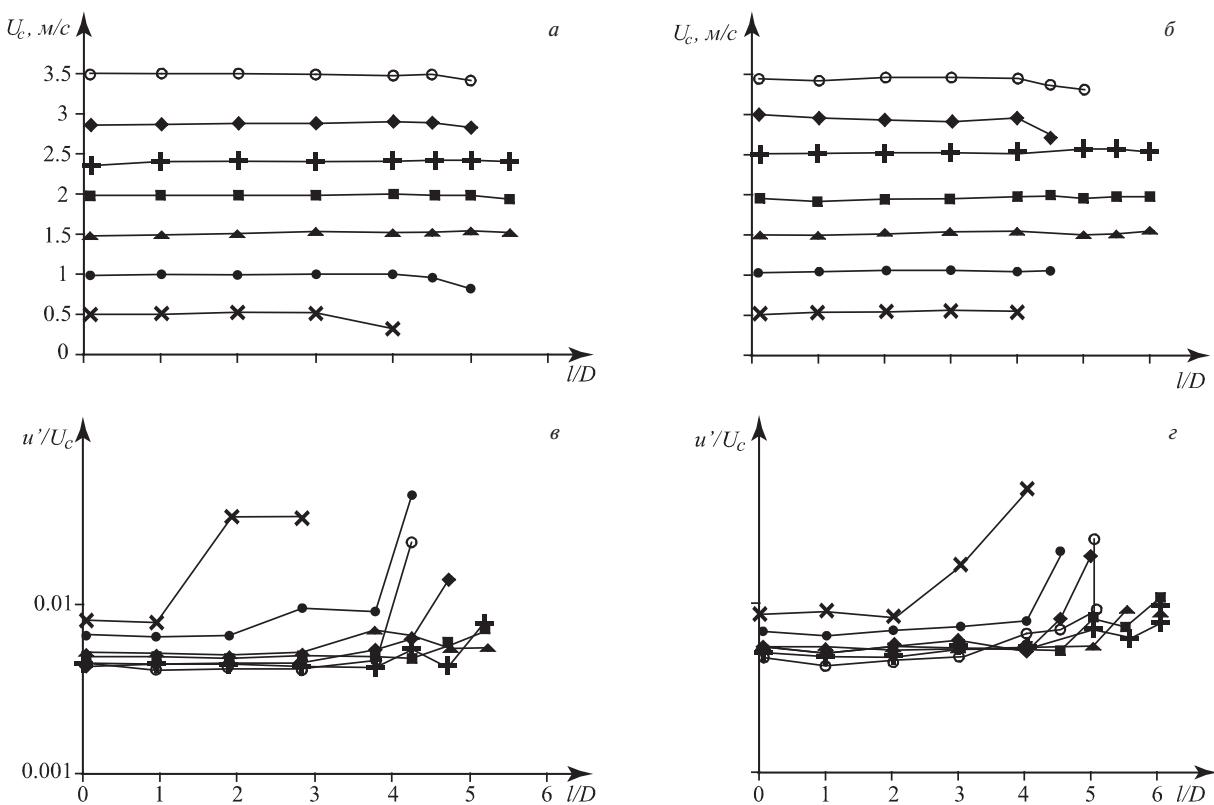


Рис. 3. Скорость  $U_c$  и относительные турбулентные пульсации  $u'/U_c$  на оси струи на различных расстояниях  $l$  от выхода из формирующего устройства в случае конфигурации I (*a*, *c*) и II (*b*, *d*)

предполагать, что струи с самым длинным ламинарным участком реализуются для данного формирующего устройства при скоростях, изменяющихся в диапазоне  $U_c = 1,5\text{--}2,5 \text{ м/с}$ .

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 2000, 3840, 5680, 7440, 9200, 10880, 12560).  $Re = \rho u_{av} D / \mu$ , где  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха,  $u_{av}$  — осредненная по площади поперечного сечения скорость, которая в данных экспериментах изменялась от 0,25 до 1,6 м/с,  $D = 0,12 \text{ м}$  — выходной диаметр диффузора,  $\mu = 1,79 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$  — динамический коэффициент вязкости воздуха. Профили скорости и турбулентных пульсаций в поперечных сечениях струи измерялись с шагом  $D$  вдоль ее 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 меньше 1%). Далее это расстояние называется длиной ламинарного участка струи. На рис. 2 $\varepsilon$ – $\delta$  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  $U_c = 2\text{--}2,5 \text{ м/с}$ , и равна 5,5 $D$  в случае конфигурации I; максимальна при скоростном режиме  $U_c \approx 2 \text{ м/с}$  и равна 5 $D$  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. 4.

Измерения показывают, что начальная интенсивность относительных турбулентных пульсаций в сравнении с другими режимами выше для первых трех скоростных режимов. Во всей видимости, это приводит к тому, что на них струя начинает разрушаться ближе к выходу из диффузора, чем на режимах с  $U_c = 2$  и 2,5 м/с. Потенциальная причина сокращения ламинарного участка струи на режимах  $U_c = 3$  и 3,5 м/с связана с особенностями прохождения струи воздуха через

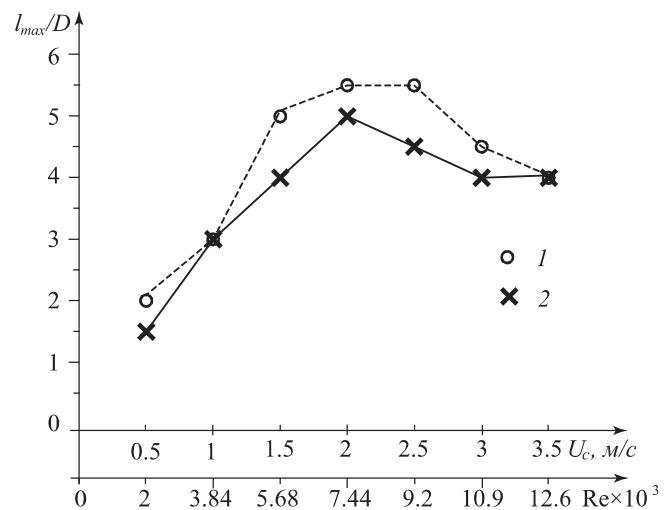


Рис. 4. Зависимость длины ламинарного участка затопленной струи  $l_{max}$  от скорости потока  $U_c$  на оси струи для конфигурации I (1) и II (2)

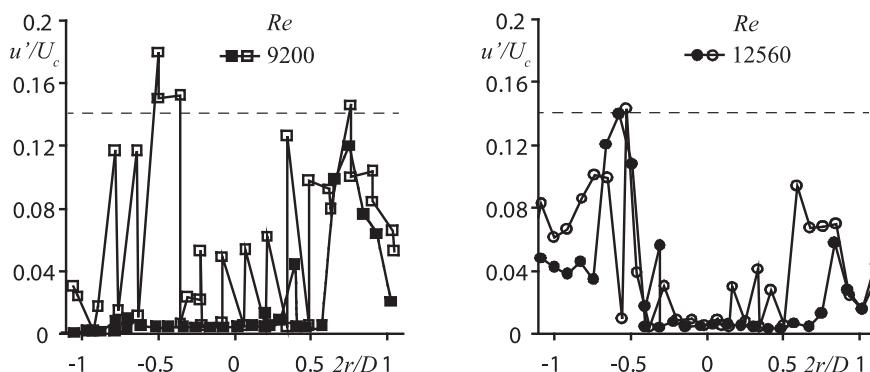


Рис. 5. Уровень турбулентных пульсаций вблизи диффузора (сплошные символы) и в начале зоны перехода к турбулентности (пустые символы)

формирующее устройство. С использованием полученных профилей скорости на выходе из диффузора были проведены предварительные численные исследования линейной задачи гидродинамической устойчивости. Они показали, что уменьшение длины ламинарного участка при скоростях, превышающих оптимальную, происходит за счет увеличения скорости роста возмущений, причем амплитуда наиболее быстро растущих возмущений максимальна в окрестности точки перегиба у внешнего радиуса струи (при  $r \approx 0,06$  м). Таким образом, режим, соответствующий наибольшей длине ламинарного участка, вырабатывается за счет оптимального баланса между входным уровнем пульсаций, т. е. начальной амплитудой возмущений, и скоростью их нарастания.

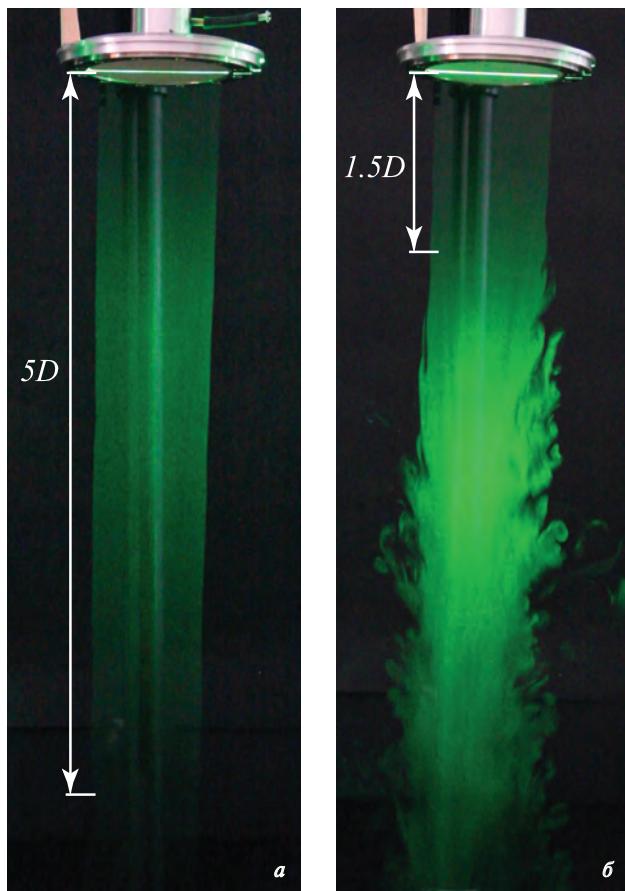


Рис. 6. Визуализация затопленной струи с длинным ламинарным (а) и переходным (б) участками в случае конфигурации II

Согласно расчетам причиной 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.

Для изучения картины течения внутри диффузора и детального исследования профиля скорости, получающегося на выходе из установки, был проведен расчет течения за ламинарирующей частью формирующего устройства — в части цилиндрического канала после втулки и в диффузоре.

Методом контрольных объемов в пакете ANSYS CFX решались уравнения Навье — Стокса и моделировалось ламинарное течение в диффузоре (т. к. эксперименты показали ламинарный характер течения в формирующем устройстве после прохождения потоком втулки). Течение в формирующем устройстве осесимметричное. Расчетная область разделена на три подобласти: первая подобласть соответствует трубе и диффузору, вторая — комбинации сеток, установленных на выходе из диффузора, третья — окружающему пространству. В первой и третьей подобластих моделируется течение воздуха с динамическим коэффициентом вязкости  $\mu = 1,79 \cdot 10^{-5}$  Па·с, течение описывается уравнениями Навье — Стокса. Комбинация сеток (вторая часть расчетной области) моделируется изотропной пористой средой, для описания которой используется дополнительный источниковый член  $S_M$  в правой части уравнения движения. Потеря количества движения задается с помощью коэффициентов проницаемости  $K_{perm}$  и сопротивления  $K_{loss}$  следующим образом:

$$S_M^i = -\frac{\mu}{K_{perm}} U^i - K_{loss} \frac{\rho}{2} |U| U^i, \quad (2)$$

где  $\mu$  и  $\rho$  — динамический коэффициент вязкости и плотность жидкости соответственно,  $U$  — скорость потока,  $i = 1, 2, 3$ ,  $|U|$  — модуль вектора скорости  $U$ . Значения коэффициентов проницаемости и сопротивления выбраны так, чтобы обеспечить перепад давления в пористой подобласти равным полученному экспериментально при выборе соответствующего пакета сеток и хорошо аппроксимированного формулой

$$\Delta p = K_1 U^2 + K_2 U, \quad (3)$$

где  $U$  — осевая компонента  $U$ ,  $\Delta p$  — измеренный экспериментально перепад давления,  $K_1 = 4,3$  кг/м,  $K_2 = 35,7$  кг/м·с<sup>2</sup>. Значения  $K_{perm} = 5 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup> и  $K_{loss} = 71696$  м<sup>-1</sup> заданы согласно (3.1) и толщине подобласти, соответствующей сеткам, 0,1 мм.

Изменения уровня турбулентных пульсаций вблизи среза диффузора показаны на рис. 5.

Третья серия экспериментов 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. 6 показано сравнение результатов визуализации затопленной струи с длинным ламинарным участком при  $U_c = 1,8 \text{ м/с}$  (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.

- Предложенный метод обладает высокой эффективностью защиты (порядка 99%). Формирование каскадного барьера позволит существенно повысить эту эффективность вплоть до уровня 99,9%.
- Формируемый за счет стационарной ламинарной струи барьер обладает высокой устойчивостью к изменениям параметров окружающей среды.
- 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 загрузочно-разгрузочные системы технологического оборудования.
- Помимо прямых применений разработанной технологии по назначению, разработанный метод обладает технической перспективой для применения непосредственно в ряде технологических процессов.

Авторы считают, что в данной работе новой является технология формирования однородной затопленной воздушной струи, с помощью которой обеспечивается возможность создания локальных чистых зон, в которых создан газодинамический барьер, с двухсторонней непроницаемостью для аэрозолей и ВМЗ. Предлагаемая в работе технология создает свободные ламинарные струи чистого воздуха, не смешивающиеся с окружающей средой, в которых производятся технологические операции. Струя образует защищенное от внешней среды поле, не имеющее твердых стенок и обеспечивающее возможности для сложных технологических манипуляций. Ключевой особенностью таких зон является возможность проведения в них технологических процессов микроэлектроники, особо чувствительных к внешним контаминациям, но требующих участия оператора. Опытные образцы установок имеют диаметры ламинарных струй до  $D = 300 \text{ мм}$ , при этом ламинарность, т. е. несмешиваемость с окружающей средой, сохраняется на расстоянии до  $6D$ . Испытания устройств проводились в МГУ имени М. В. Ломоносова [4, 5] 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).

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.

Также необходимо исследовать возможность создания коаксиальных ламинарных струй по типу «струя в струе»,

Таблица 4

Диаметр струи (чистой зоны) — $D$	до 0,8 м
Длина формирующего устройства	1,5D
Длина ламинарного участка струи (чистой зоны)	до 6D
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 %

применение которых позволяет создавать каскадные газодинамические барьеры, за счет чего повышается эффективность предлагаемой технологии защиты процессов и продуктов микро- и наноэлектроники.

С точки зрения практического применения найденного решения в дальнейшем совместно с технологическими партнерами — изготовителями систем по созданию локальных зон высокого уровня чистоты планируется разработка ряда единиц технологического оборудования, предназначенного для применения как в производстве, так и для лабораторных исследований. В табл. 4 приведены возможные диапазоны характеристик установки и чистой зоны, создаваемой установкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Уайт В. Технология чистых помещений. — Клиндум, Москва, 2002.
- ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 4. Проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию.
- Уэйт К. Использование ламинарных шкафов и боксов для защиты от загрязнений взвешенными в воздухе частицами, Clean Air Products (USA) // Clean Rooms, September, 2008.
- 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.
- Зайко Ю.С., Решмин А.И., Тепловодский С.Х., Чичерина А.Д. Исследование затопленных струй с увеличенной длиной начального ламинарного участка // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа, 2018. — № 1. — С. 97–106.
- Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника. Часть 1. Уровни описания технологии // Электронная техника. 2017. Серия 3. Вып. 1 (165). — С. 51–69.
- ITRS (International Technologies Roadmap for Semiconductors).
- ГОСТ Р ИСО 14644-7. Изолирующие устройства (укрытия с чистым воздухом), боксы перчаточные, изоляторы и миниокружения.
- ГОСТ Р ИСО 14644-1. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха.
- ГОСТ Р ИСО 14644-8. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 8. Классификация молекулярных загрязнений в воздухе.



11. ГОСТ Р ИСО 14644-9. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 9. Классификация чистоты поверхностей по концентрации частиц.
12. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. — М.: Наука, 1960. — 715 с.
13. Crow S. C., Champagne F. H. *Orderly structure in jet turbulence* // J. Fluid Mech. 1971. V. 48. № 3. P. 547–591.
14. Зайцев М. Ю., Копьёв В. Ф., Чернышев С. А. Экспериментальное исследование волн неустойчивости в механизме излучения шума сверхзвуковой струей // Изв. РАН. МЖГ, 2009. — № 4. — С. 124–133.
15. Veser A., Kuznetsov M., Fast G., Friedrich A., Kotchourko N., Stern G., Schwall M., Breitung W. *The structure and flame propagation regimes in turbulent hydrogen jets* // Int. J. Hydrogen Energy. 2011. V. 36. № 3. P. 2351–2359.
16. Andrade E. N. da C. *The velocity distribution in a liquid-into-liquid jet. Part 2: the plane jet* // Proc. Phys. Soc. 1939. V. 51. P. 784–793.
17. Sato H. *The stability and transition of a two-dimensional jet* // J. Fluid Mech. 1959. V. 7. № 1. P. 53–80.
18. Silcock G. *On the stability of parallel stratified shear flows* // Ph.D. dissertation. University of Bristol, 1975.
19. Drazin P. G., Reid W. H. *Hydrodynamic Stability* // Cambridge University Press, 2004.
20. Batchelor G. K., Gill A. E. *Analysis of the stability of axisymmetric jets* // J. Fluid Mech. 1962. V. 14. № 4. P. 529–551.
21. Rayleigh Lord. *Scientific papers* // Cambridge University Press, 1892. V. 3. P. 575.
22. Lessen M., Singh P. J. *The stability of axisymmetric free shear layers* // J. Fluid Mech. 1973. V. 60. № 3. P. 433–457.
23. Zaman K. B. M. Q., Hussain A. K. M. F. *Turbulence suppression in free shear flows by controlled excitation* // J. Fluid Mech. 1981. V. 103. P. 133–159.
24. Hussain A. K. M. F., Hasan A. Z. *Turbulence suppression in free turbulent shear flows under controlled excitation. Part 2. Jet-noise reduction* // J. Fluid Mech. 1985. V. 150. P. 159–168.
25. Грек Г. В., Козлов В. В., Литвиненко Ю. А. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение // Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т., 2013. — 240 с.
26. 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. — С. 59–73.
27. Kozlov V., Grek G., Litvinenko Yu., Kozlov G., Litvinenko M. *Round and plane jets in a transverse acoustic field* // J. Engineering Thermophysics. 2011. V. 20. № 3. P. 272–289.
28. 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.
29. Леманов В. В., Терехов В. И., Шаров К. А., Шумейко А. А. Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 9. — С. 34–40.
30. Навознов О. И., Павельев А. А., Яценко А. В. О переходе к турбулентности в затопленных и спутных струях // Изв. АН СССР. МЖГ, 1972. — № 4. — С. 148–154.
31. Решмин А. И., Тепловодский С. Х., Трифонов В. В. Круглый короткий диффузор с большой степенью расширения и проницаемой перегородкой // Изв. РАН. МЖГ, 2012. — № 5. — С. 32–39.
32. Решмин А. И., Тепловодский С. Х., Трифонов В. В. Турбулентное течение в круглом безотрывном диффузоре при числах Рейнольдса меньших 2000 // Изв. РАН. МЖГ, 2011. — № 2. — С. 121–130.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 760 руб.

### ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ МИКРОСХЕМ ОТ ОБРАТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**В. Н. Федорец, Е. Н. Белов, С. В. Балыбин**

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 212 с.  
ISBN 978-5-94836-562-6

В книге рассмотрены вопросы обеспечения информационной безопасности современной электронной компонентной базы, используемой при разработке радиоэлектронной аппаратуры различного назначения. Особое внимание уделено вопросам уязвимости, возникающим при разработке и изготовлении микросхем, создаваемых по fabless-технологии.

Авторами рассмотрены инженерно-технические и организационно-методические решения по защите от обратного проектирования современных микросхем.

Книга может быть полезна специалистам в области микроэлектроники, разработчикам отечественной элементной базы, а также студентам, обучающимся по специальностям, связанным с разработкой микросистем и информационной безопасностью.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru