

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. К. А. ВАЛИЕВА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



*Посвящается 35-летию  
Физико-технологического института им. К.А. Валиева  
Российской академии наук*

# **ТРУДЫ** **ФТИАН**

Основаны в 1991 году  
Главный редактор  
член-корреспондент РАН В.Ф. ЛУКИЧЁВ

МОСКВА НАУКА 2024

**ТРУДЫ**  
**ФТИАН**

Том 32

**КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ,  
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**  
физика, технология, диагностика  
и моделирование

Ответственный редактор  
доктор физико-математических наук  
К.В. РУДЕНКО

Рецензенты:

*член-корреспондент РАН В.Ф. Лукичёв,  
доктор технических наук П.П. Мальцев*

**Труды Физико-технологического института** / гл. ред. В.Ф. Лукичёв ; Физико-технологич. ин-т им. К.А. Валиева РАН. — М. : Наука, 1991 — . — ISSN 0868-7129.

**Т. 32: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника : физика, технология, диагностика и моделирование** / отв. ред. К.В. Руденко. — 2024. — 483 с. — ISBN 978-5-02-041043-5.

Том 32 Трудов ФТИАН посвящен 35-летию Института и предваряется кратким очерком истории становления и развития Института как ведущей научной организации в области микро- и наноэлектроники, твердотельных устройств для квантовых вычислений. Сборник содержит результаты по актуальным научным направлениям, полученным лабораториями как Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН, так и Ярославского филиала ФТИАН. Представлены работы в области квантовых вычислений, физики и технологии приборов наноэлектроники, МЭМС, изготовления микро- и наноструктур, моделирования приборов и технологических процессов.

Для широкого круга специалистов в области квантовых информационных технологий, микро- и наноэлектроники, а также студентов и аспирантов, обучающихся по соответствующим специальностям.

ISBN 978-5-02-041043-5

- © Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, 2024
- © Российская академия наук и издательство «Наука», продолжающееся издание «Труды ФТИАН» (разработка, оформление), 1991 (год основания), 2024
- © ФГБУ Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2024

УДК 537.525

И.И. АМИРОВ, О.В. МОРОЗОВ

## ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР В ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ И СЕНСОРОВ

Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН

Приведены результаты исследования процессов глубокого реактивно-ионного травления структур в кремнии, которые используются при изготовлении микрогироскопов, микроакселерометров и микроактюаторов, а также результаты разработки процессов сквозного травления кремниевой пластины и формирования сверхвысокоаспектных, микростолбчатых, нанопроволочных структур Si. Приведены особенности травления канавочных структур с разноаспектным отношением и высокоаспектных микроструктур.

### Введение

В технологии изготовления различных устройств микросистемной техники (МСТ) плазменные процессы травления Si являются ключевым фактором, определяющим их характеристики. Разработка глубокого реактивно-ионного травления (ГРИТ) кремния (Bosch-процесс) позволила перейти к созданию нового поколения трехмерных чувствительных элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС), инерционных датчиков, микрогироскопов, микроакселерометров, микроактюаторов, устройств микрофлюидики и 3D интегрированных систем [1–4]. Плазменные процессы ГРИТ применяются при изготовлении MEMS-датчиков давления, потоков [5], микрофонов [6], газовых сенсоров и биосенсоров [7, 8], различных устройств «умного дома» [9]. Для изготовления таких устройств МСТ используются процессы глубокого травления структур с разным аспектным отношением (АО), не превышающим 25 (АО определяется отношением глубины травления к ширине канавки). Это наиболее распространенный тип процессов ГРИТ. К другому типу процессов ГРИТ можно отнести процессы травления сверхвысокоаспектных структур Si, аспектное отношение которых больше 25. Такие микро- и наностолбчатые структуры или нанопроволочные структуры являются перспективными мате-

риалами термоэлектрических преобразователей, биосенсоров и преобразователей солнечной энергии [10–12].

В статье будут приведены результаты исследования этих двух типов процессов ГРИТ, которые были использованы при изготовлении микрогироскопов и микроакселерометра, микроактюатора, результаты разработки процессов сквозного травления кремниевой пластины и формирования сверхвысокоаспектных, микростолбчатых, нанопроволочных структур Si.

## 1. Плазменные процессы глубокого травления Si в технологии изготовления чувствительных элементов микрогироскопов, микроакселерометров и актюаторов

Глубокое реактивно-ионное травление — это циклический, двух-трехстадийный плазмохимический процесс травления Si, который осуществляется в плазме переменного состава  $SF_6/C_4F_8$  или  $SF_6/O_2$ . Основные достоинства процесса — высокая скорость, селективность и высокая анизотропность травления Si. Кроме того, варьируя длительность стадий, энергию ионов, можно получать структуры с необходимым профилем. В этом проявляется его высокая функциональность. В основе реализации ГРИТ лежит принцип разделения процессов травления и пассивации во времени, который осуществляется путем циклической подачи в плазмохимический реактор потоков травящего ( $SF_6$ ) и пассивирующего (в данном случае  $C_4F_8$ ) реагентов (рис. 1, а). Травление

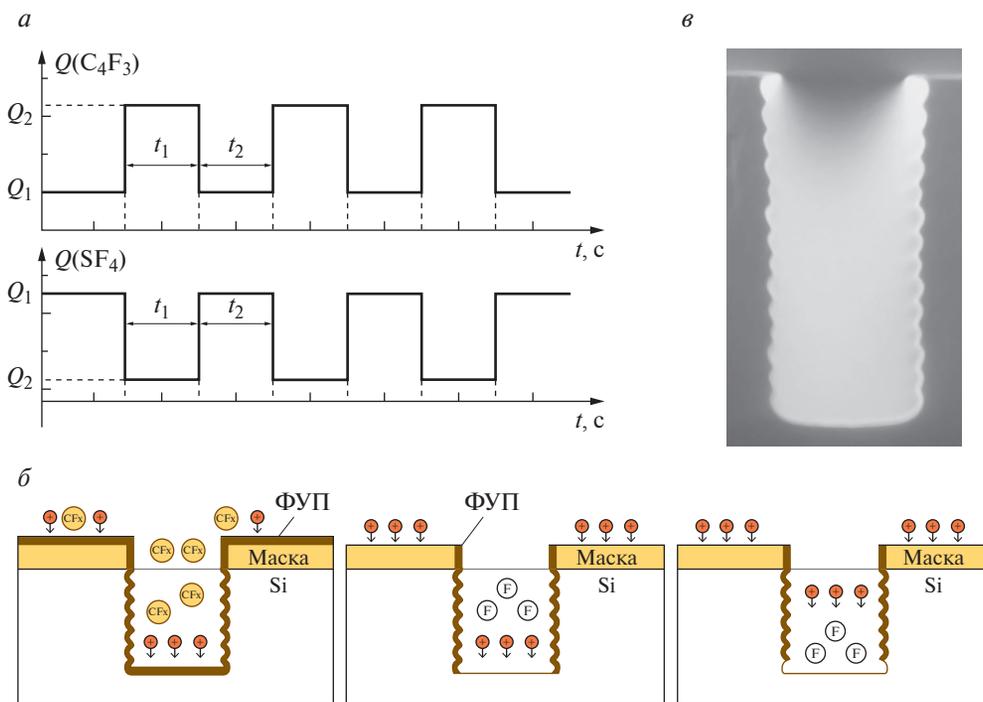


Рис. 1. а, б — Последовательность стадий травления структур в Bosch-процессе; в — вид канавки после травления в циклическом двухстадийном процессе

кремния осуществляется в плазме  $\text{SF}_6$ , а пассивация – во фторуглеродной плазме  $\text{C}_4\text{F}_8$ . На стадии пассивации в плазме  $\text{C}_4\text{F}_8$  происходит осаждение на боковых стенках канавки фторуглеродной полимерной пленки (ФУП) (рис. 1, б). На следующей стадии травления в плазме  $\text{SF}_6$  осуществляется быстрое удаление ФУП на дне канавки, а затем и Si в реакции с атомами фтора. Анизотропное травление обусловлено образованием на боковой поверхности канавки пассивирующей пленки. Длительность стадий обычно составляет несколько секунд. Затем этот цикл многократно повторяется. Пассивирующая пленка на боковой стенке канавки при этом должна сохраняться для предотвращения бокового травления Si. В результате такого травления стенки канавки имеют характерный гребенчатый вид, который обусловлен изотропным характером травления Si на стадии травления (рис. 1, в). Сохранение баланса травление/пассивация на боковой стенке является условием реализации Bosch-процесса [12, 13]. Характеристики процесса зависят от многих параметров: давления, мощности, потенциала ВЧ-смещения, расходов газа, состава  $\text{SF}_6/\text{C}_4\text{F}_8$  смеси, температуры подложки, отношения длительности времен пассивации и травления, а также организации процесса.

Сложность Bosch-процесса заключается в том, что ВА травление должно быть обусловлено протеканием 5 согласованных ионно-стимулированных реакций и радикальных, происходящих на дне канавки и ее стенках. Это процессы радикального травления Si в плазме  $\text{SF}_6$ , ионно-стимулированного травления и осаждения ФУП на дне канавки, радикального травления и осаждения ФУП на боковой стенке. Характер травления определяется уровнем согласования этих реакций. Ввиду сложности и многопараметричности процесса моделирование становится необходимым элементом исследования и разработки процессов. Моделирование с учетом всех реакций на поверхности показало удовлетворительное согласие с экспериментом, что свидетельствовало о правильности понимания механизма процесса [14].

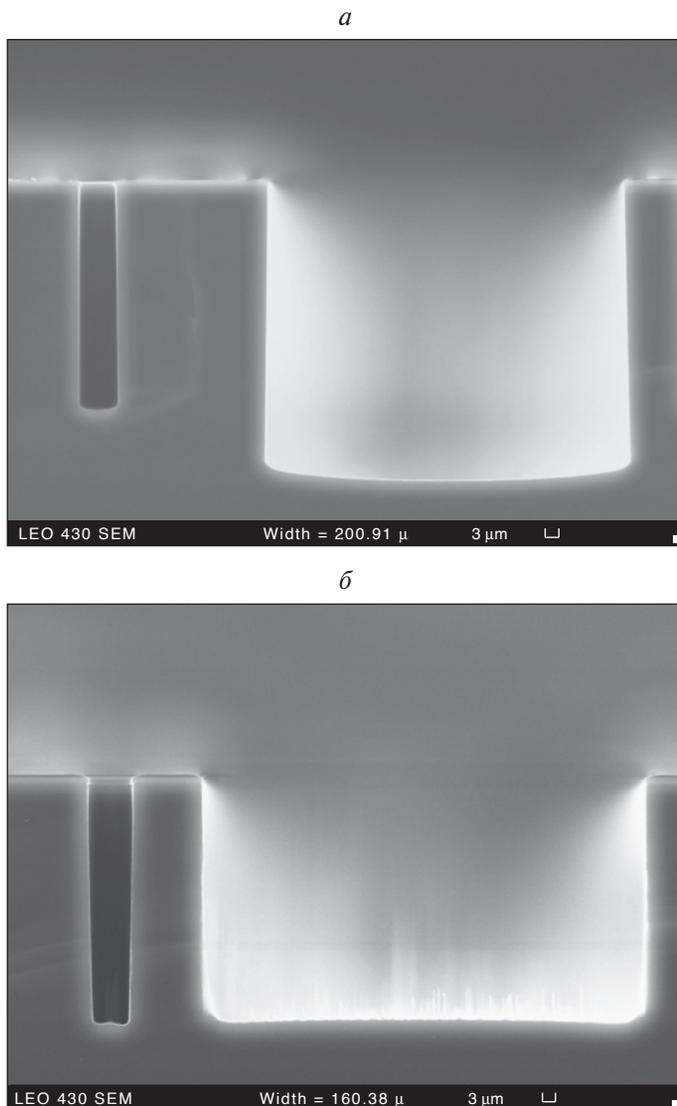
Для достижения высокой скорости и анизотропности травления Si в процессе ГРИТ стадии травления должны выполняться следующие условия. Первое – это скорость травления Si должна быть максимальной. Второе – угловое распределение ионов по энергии должно быть как можно более узким. Однако условия выполнения этих требований противоречат друг другу. Высокая скорость травления достигается при повышенном давлении и расходе газа, когда концентрация атомов фтора максимальна. Однако при этом в результате увеличения числа столкновений в приэлектродном слое угловое распределение ионов становится более широким. Оптимальное давление на стадии травления – 4–5 Па. При формировании структур с высоким аспектным (ВА) отношением давление должно быть ниже. При оптимальных условиях проведения процесса можно получить канавки разной ширины с вертикальными стенками (рис. 2). Однако условия процессов ГРИТ узких (ширина 3 мкм) и широких (20 мкм) канавок были разными, так как в одном процессе канавки разной ширины травятся на разную глубину. Это обусловлено разным потоком химически активных частиц, поступающих на дно узких и широких канавок. Подавление такого аспектно-зависимого травления является сложной задачей [12, 13, 15].

На рис. 3, б приведен пример реализации аспектно-независимого травления канавок, которая достигается путем значительного увеличения длительности стадии пассивации [16, 17]. В этом случае происходит замедление скорости



**Рис. 2.** РЭМ снимки канавочных структур шириной 3 мкм (*a*) и 20 мкм (*б*)

травления Si в широких канавках, а падение скорости травления в узких канавках гораздо меньше. При этом стенки широких канавок являются вертикальными. Теоретически такой процесс может быть реализован для формирования канавок с большим АО [17], но практически не удается получить канавки одинаковой высоты с  $AO > 10$ . Это обусловлено тем, что при сильной пассивации на дне широкой канавки начинают возникать микроиглы. Анализ причины их возникновения показал, что образование микроигл обусловлено образованием микромаскирующих углеродных остатков травления неоднородной по толщине пассивирующей ФУП на дне канавки [18].

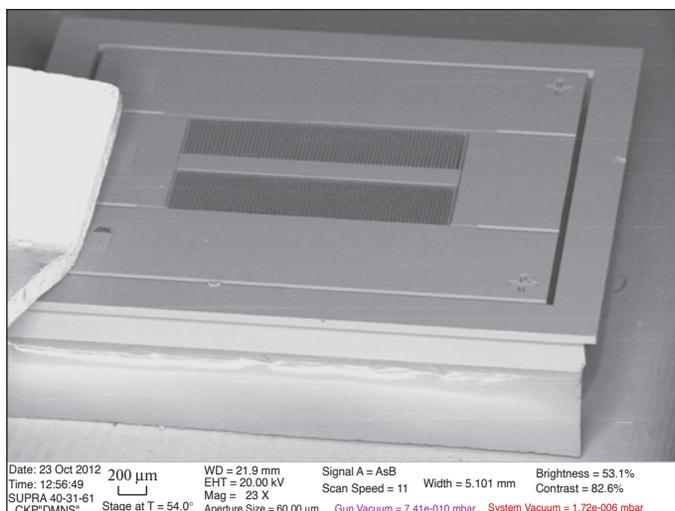


**Рис. 3.** РЭМ снимки профиля широкой и узкой канавки, полученные в режимах аспектно-зависимого (*a*) и аспектно-независимого травления (*б*)

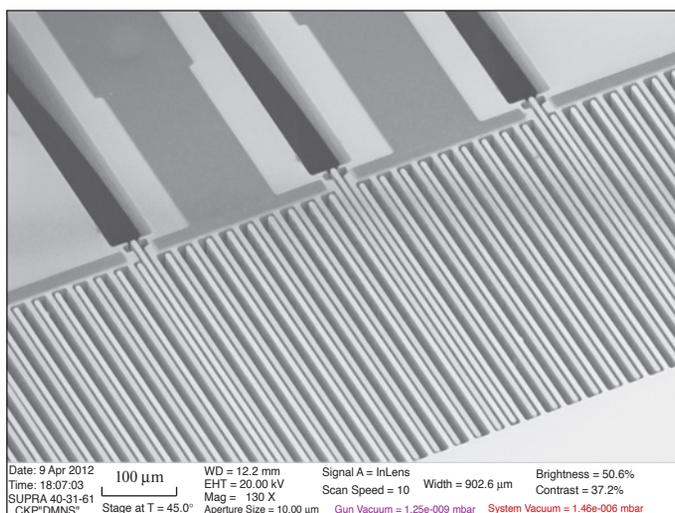
Для изготовления кремниевых чувствительных элементов различного типа – микроакселерометров и микрогироскопов – разработаны плазменные процессы травления Si структур через маску размерами от единиц до десятков микронов, как это видно на примере структур чувствительных элементов (ЧЭ) микроакселерометра (рис. 4, *a* и *б*) и микрогироскопа кольцевого типа (рис. 4, *в* и *г*).

Размеры канавок между встречно-штыревыми структурами микроакселерометра и размеры разделительных канавок отличались в несколько раз (рис. 4, *б*), поэтому был разработан оптимизированный процесс их травле-

*a*



*б*

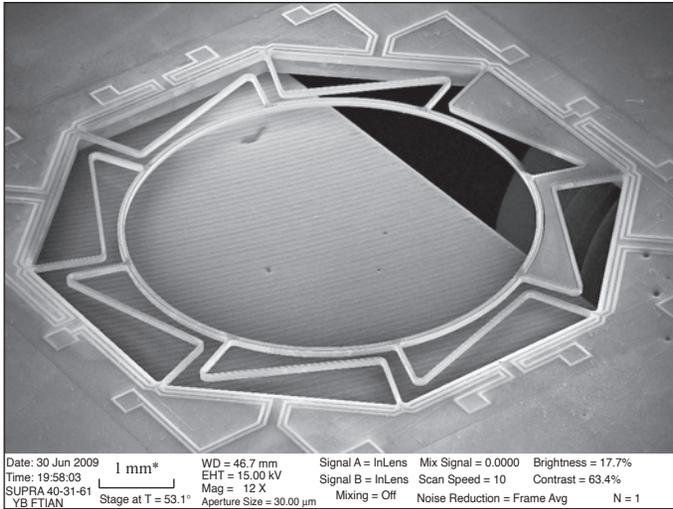


**Рис. 4.** Вид под разным увеличением чувствительных элементов микро-акселерометра (*a, б*) и микрогироскопа кольцевого типа (*в, г*)

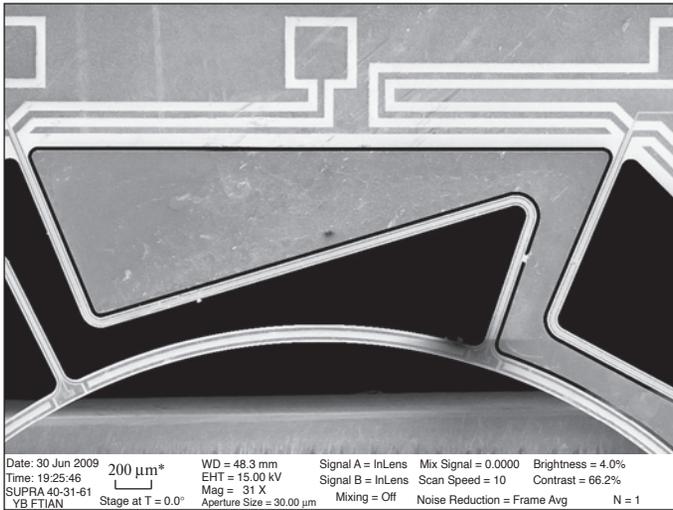
ния [19]. Для формирования структур с сильно различающимися размерами элементов, как, например, при изготовлении ЧЭ микрогироскопа кольцевого типа (рис. 4, *в, г*), был использован прием контурного травления отдельных блоков разрезными канавками. На рис. 4, *г* показан такой не удаленный блок Si.

Более сложный случай наблюдался при формировании ЧЭ микрогироскопа торсионного типа (рис. 5, *а*). В этом случае травление разрезными канавками необходимо было провести с двух сторон пластины, с точным литографическим совмещением рисунка маски (рис. 5, *б*) [20].

6



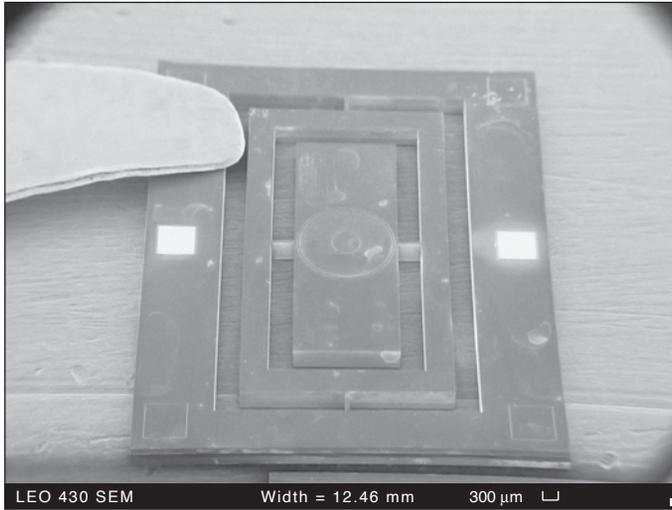
2



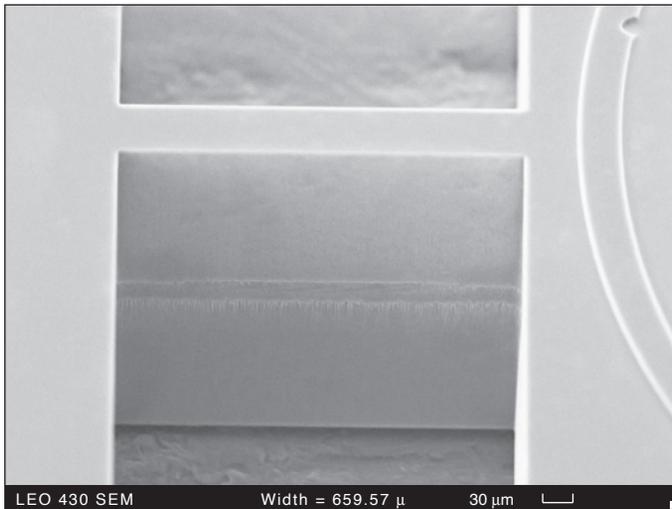
**Рис. 4. (Окончание)**

Создание современных интегрированных приборов микросистемной техники, в которых на одном чипе формируются чувствительные элементы МЭМС и микроэлектронные схемы обработки сигналов, основано на технологии полностью их электрической изоляции. Поэтому такие приборы создаются на КНИ-структурах. В этом случае полную изоляцию активных и пассивных элементов можно осуществить способом щелевой изоляции. Однако КНИ-структуры дорогие и поэтому разрабатываются различные технологии создания изолирующих областей в обычной пластине кремния. Предлагаемая

*a*



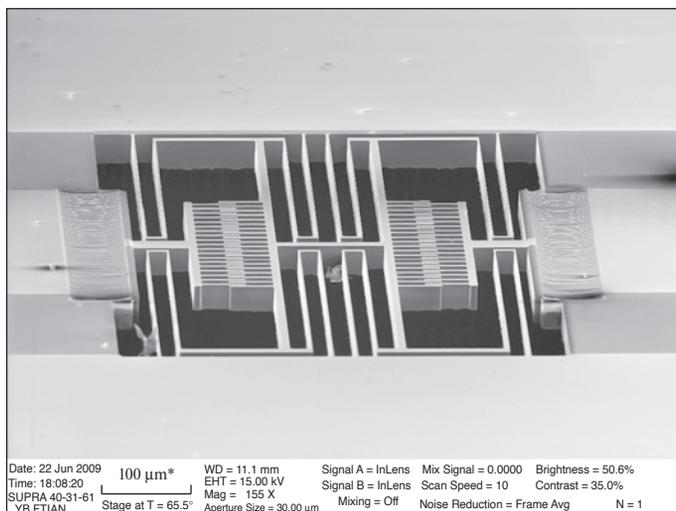
*б*



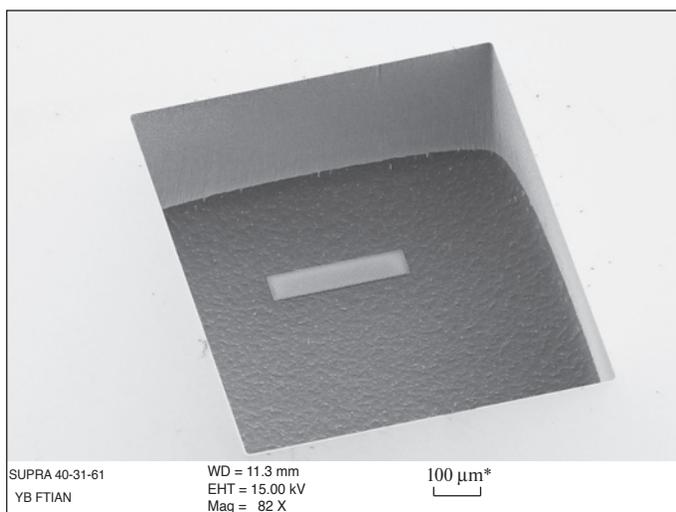
**Рис. 5.** Вид под разным увеличением чувствительных элементов микрогроскопа торсионного типа (*a, б*)

новая технология изготовления приборов МЭМС основывается на создании объемных электрически изолированных областей (ЭИЗО) в пластине Si. С помощью данной технологии можно сформировать актюаторы на пластинах Si, а не только на пластинах КНИ. В работе представлена конструкция актюатора, которая может быть использована также в качестве перестраиваемого в широком диапазоне микроконденсатора. Ключевым процессом данной технологии является травление канавок с высоким аспектным отношением в Si. Три процесса – глубокое анизотропное травление Si, глубокое термическое окисление

*a*



*б*



**Рис. 6.** РЭМ снимок микроактюатора (*a*) и снимок приборного слоя со встроенной диэлектрической областью (вид с тыльной стороны пластины) после адаптированного высокоскоростного (6 мкм/мин) Bosch-процесса (*б*)

кремния и высокоселективное объемное анизотропное травление Si – являются основой ЭИЗО технологии [21, 22].

На рис. 6 показана конструкция микроактюатора, изготовленного по предлагаемой технологии. На первой стадии технологии формируются электрически изолированные области. Для этого в пластине Si создаются две пары набора глубоких канавок в Si шириной 2 мкм и толщиной стенок 2 мкм. Глубина травления равнялась 50 мкм. Затем проводилась операция полного окисления

стенок канавки. В результате этой операции образовывался диэлектрический  $\text{SiO}_2$  блок в объеме Si. Он обладает достаточной прочностью, чтобы удерживать фиксированные гребенки гребенчатого привода (рис. 6, а). Их формирование осуществлялось путем объемного глубокого травления Si с обратной стороны пластины до полного вывешивания челнока с пружинами (рис. 6, б). При этом они электрически связаны с пластиной Si, а на фиксированные гребенки можно подавать управляющее напряжение для приведения в движение челнока.

## 2. Плазменные процессы глубокого сквозного травления Si (технология TSV)

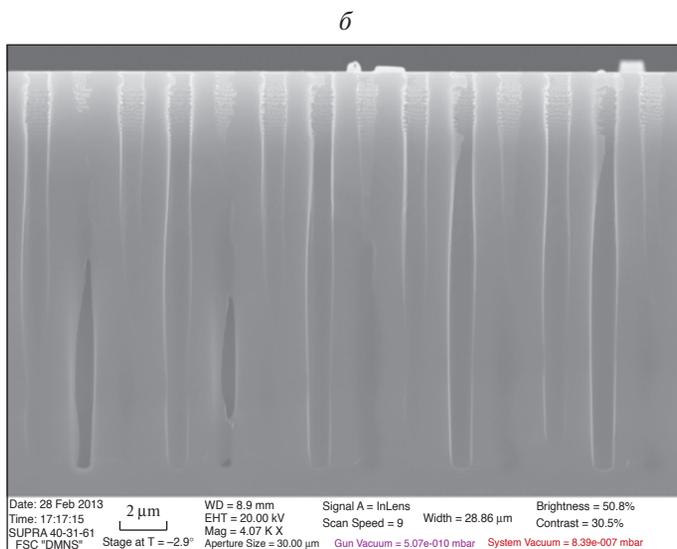
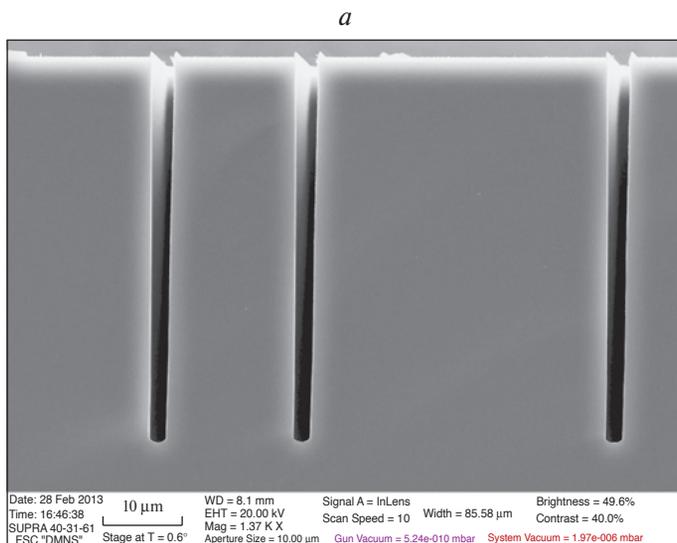
Операция сквозного травления кремниевой пластины (through-silicon via, TSV) является одной из ответственных стадий технологии 3D-интеграции [3, 23–25]. Размер сквозных отверстий определяется областью их конкретного использования. Для оптимального заполнения канавок медью отношение диаметра отверстия к толщине пластины равняется толщине  $\sim 20$  [25]. При толщине пластины 460 мкм диаметр отверстий составляет 20–30 мкм. Для утоненной пластины кремния диаметр отверстия будет меньше. Можно отметить, что в последнее время создание сквозных вертикальных каналов в пластине Si используется в устройствах микрофлюидики для прокачки жидкости [4].

Плазмохимические процессы травления сквозных каналов также основываются на ГРИТ технологии. Основными требованиями, предъявляемыми к таким процессам, являются обеспечение гладкости стенок и желательный положительный наклон стенок вертикальных каналов, когда диаметр на вершине меньше, чем у основания (рис. 7). Для уменьшения гребенчатой поверхности стенок канала, характерного при реализации обычного процесса ГРИТ, можно по его окончании провести травление в плазме  $\text{SF}_6$  с сглаживанием поверхности стенок [26] или уменьшить длительность стадии травления до 1 секунды [27]. Это позволяет получить достаточно гладкие стенки с шероховатостью  $\sim 10$  нм. Для формирования TSV каналов диаметром меньше 2 мкм оптимизация процесса травления заключается в изменении параметров процесса во времени [28].

Скорость травления Si в процессе TSV травления в зависимости от диаметра канала составляет 2–10 мкм с селективностью к оксидной маске до 300. После травления удаление пассивирующей фторуглеродной пленки осуществляется в плазме  $\text{O}_2/\text{Ar}$ .

## 3. Глубокое реактивно-ионное травление сверхвысокоаспектных Si микроструктур

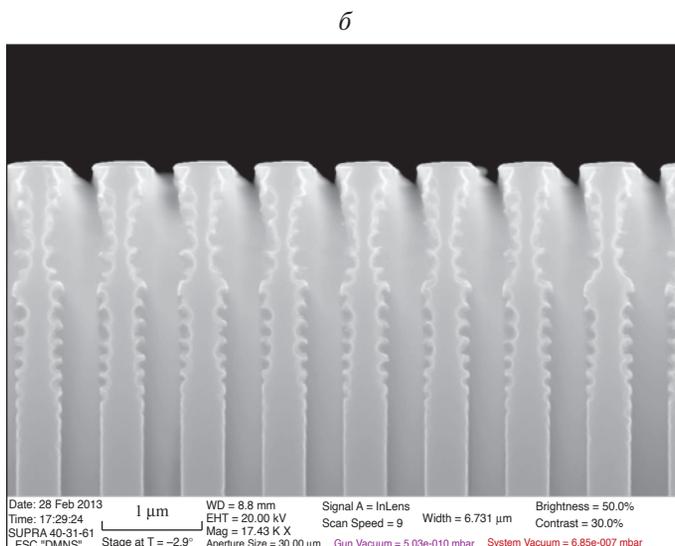
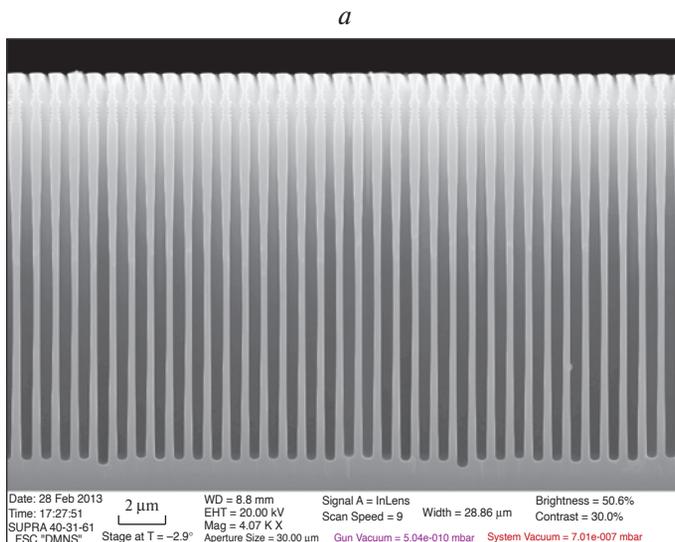
Для получения кремниевых структур со сверхвысокоаспектным (CBA) отношением ( $\text{AO} > 25$ ) используется общая стратегия, заключающаяся в изменении условий травления во времени [12, 30–34]. Если при достижении канавок с  $\text{AO} < 20$  изменение параметров процесса было минимальным, то с увеличением глубины травления необходимо в первую очередь усиливать стадию пассивации. Это обусловлено тем, что с увеличением глубины канавки увеличивается площадь боковых стенок, а значит, толщина пассивирующей



**Рис. 7.** Вид глубоких канавок (*a*) и каналов (*б*) в Si с сужением на дне

фторуглеродной пленки на ней уменьшается. Недостаток пассивации приводит в первую очередь к сильному искажению профиля МН структур и к подтраву под маску, возникновению эффекта бокового травления – уширению канавки в середине (*bowing*).

На примере травления глубоких канавок (рис. 8, *a*) показаны эти дефекты травления СВА структур в условиях недостаточной пассивации. Наблюдается характерный зубчатый затрав вблизи вершины канавки с тонкой металлической маской Cr (рис. 8, *б*). Можно отметить селективность травления Si по отношению к Cr больше 1000, что облегчает реализацию СВА травления.

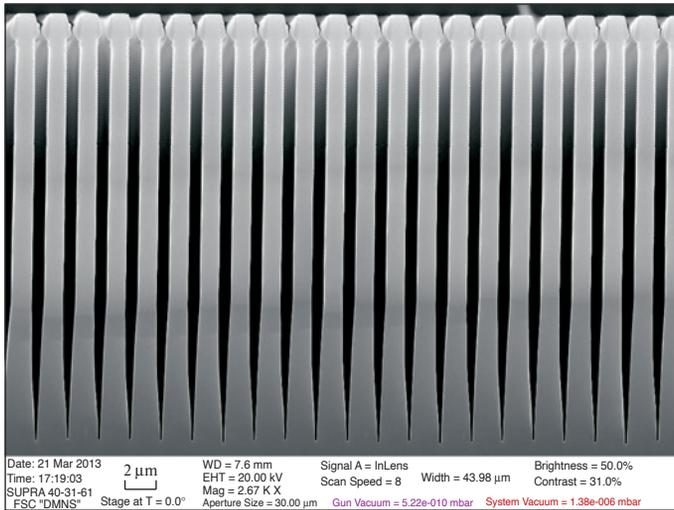


**Рис. 8.** Вид профиля глубоких канавок (ширина 0.5 мкм) в Si ( $AO = 32$ ), получаемых при неизменных параметрах процесса (*a*), и вид дефектов канавочных Si структур (*б*) под металлической маской (Cr)

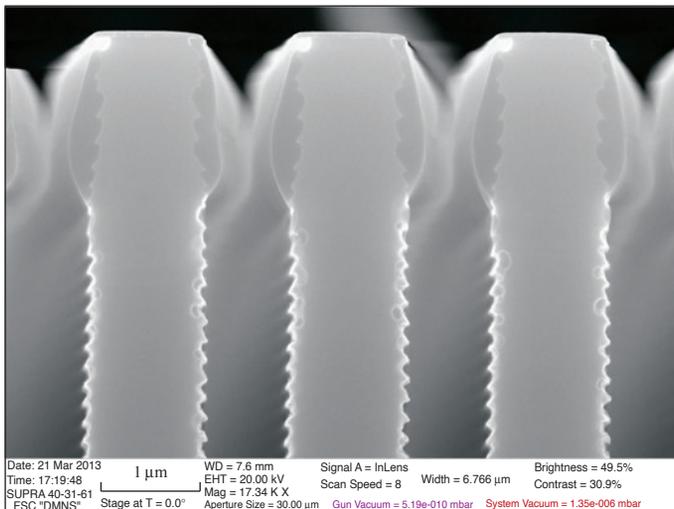
Усиление стадии пассивации путем увеличения длительности стадии или увеличения расхода газа  $C_4F_8$  позволяет избавиться от этих дефектов (рис. 9, *a*). Однако при длительных процессах (200–500 циклов) это приводит к накоплению пассивирующей фторуглеродной пленки (ФУП) на боковых стенках канавки вблизи вершины (рис. 9, *б*).

Вследствие этого перекрывается доступ атомам фтора в глубь канавки, что ведет к заострению дна канавки с последующим резким замедлением травления. Для удаления избыточной ФУП на вершине канавки были разра-

*a*



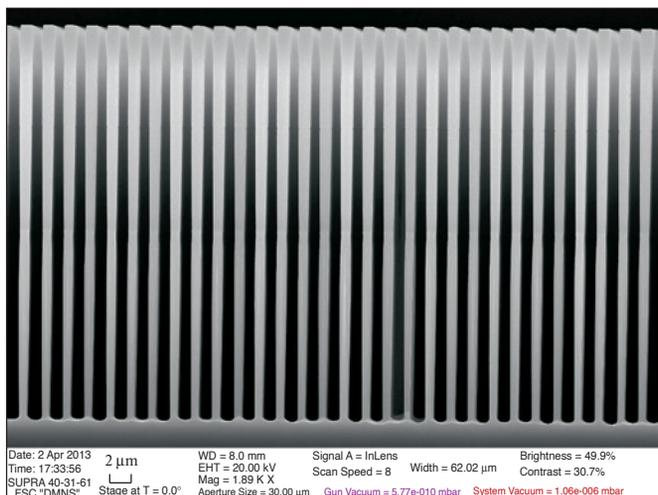
*b*



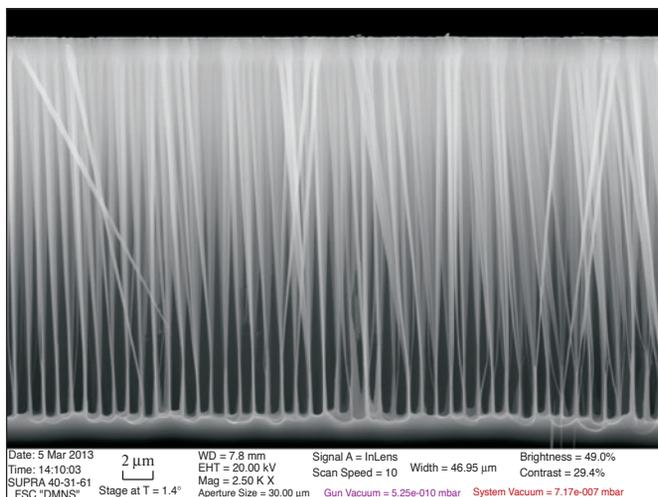
**Рис. 9.** Вид профиля глубоких канавок (ширина 0.5 мкм) в Si ( $AO = 32$ ), получаемых при неизменных параметрах процесса и усиленной стадии пассивации (*a*), и вид профиля канавки вблизи вершины (*b*)

ботаны трех- и четырехстадийные процессы травления [30]. Трехстадийный процесс включал стадию депассивации в аргоновой плазме, а четырехстадийный – еще дополнительно короткую стадию травления избыточной фторуглеродной пленки. Это позволило получить канавки с  $AO$  более 40 [20]. Однако введение дополнительных стадий ведет к замедлению скорости травления. Избыточную ФУП на боковой стенке можно удалять не в каждом цикле, а после проведения 50–100 циклов с проведением дополнительной пассивации.

*a*



*b*



**Рис. 10.** СВА канавки в Si с АО  $\sim 35$  шириной 1  $\mu\text{м}$  (*a*) и нанопроволочных структур Si с АО  $\sim 100$  (*b*)

В этом случае замедление скорости травления будет меньше и можно получить вертикальные канавки с АО  $\sim 35$  (рис. 10, *a*). Такие СВА решетки необходимы для разработки рентгеновских интерферометрических систем [33]. В таком трехстадийном режиме ГРИТ можно получить СВА нанопроволочные структуры Si (рис. 10, *b*), если травление проводить через маску субмикронными размерами элементов. В этом случае отношение высоты нанопроволочных структур к толщине нанопроволок достигает 100. Важным параметром проведения процесса является энергия ионов на стадии травления. Энергия нужна для быстрого удаления ФУП на начальной стадии травления. Кроме того, с увеличением энергии ионов угловое распределение ионов уменьшается, что способствует получению более вертикальных стенок.

Необходимо отметить, что из-за апертурных ограничений [15–17] скорость травления СВА структур является относительно низкой ( $< 2$  мкм/мин). При этом характерные зазубрины на боковых стенках, присущих циклическому процессу, при достижении определенного АО не образуются. Такое травление можно характеризовать как квази-Bosch-процесс. Стратегия непрерывного изменения параметров процесса ГРИТ – энергии ионов, длительность стадий травления/пассивации, расходов газов – позволяет получать канавки шириной 2–5 мкм и глубиной до 400 мкм с аспектным отношением до 80 [32], а также ВА каналы диаметром 300–500 нм [34].

## Выводы

В статье приведены результаты исследования получения высокоаспектных ( $AO < 25$ ) и сверхвысокоаспектных ( $AO > 25$ ) кремниевых структур в оптимизированных процессах глубокого реактивно-ионного процесса травления. Показано использование таких процессов при изготовлении чувствительных элементов микрогироскопов, микроакселерометров и микроактюаторов, а также при формировании сквозных каналов в кремниевых пластинах для 3D-интеграции. Показаны основные негативные проблемы изготовления СВА вертикальных структур и методы их подавления. Получение ВА с желаемыми размерами, требованиями к гладкости стенок возможно в результате разработки специализированных процессов ГРИТ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Laermer F., Urban A.* MEMS at Bosch–Si plasma etch success story, history, applications, and products // *Plasma Proc. Polym.* 2019. e1800207.
2. *Langfelder G., Bestetti M., Gadola M.* Silicon MEMS inertial sensors evolution over a quarter century // *J. Micromech. Microeng.* 2021. Vol. 31. P. 084002.
3. *Shen W.-W., Chen K.-N.* Three-dimensional integrated circuit (3D IC) key technology: through-silicon via (TSV) // *Nanoscal. Resear. Lett.* 2017. Vol. 12. P. 5.
4. *Yadavali S., Lee D., Issadore D.* Robust microfabrication of highly parallelized three-dimensional microfluidics on silicon // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9. P. 12213.
5. *Bittner A., Hochstein D., Rockstroh J., Dehnert J., Hedrich F., Billat S., Dehé A.* Plasma techniques in the production of customized MEMS-applications // *Plasma Proc. Polym.* 2019. Vol. 16. P. 1900047.
6. *Zawawi S.A., Hamzah A.A., Majlis B.Y., Mohd-Yasin F.* A review of MEMS capacitive // *Microphon. Micromach.* 2020. Vol. 11. P. 484.
7. *Asri M.I.A., Hasan Md.N., Fuaad M.R.A., Yunos Y.Md., Ali M.S.M.* MEMS gas sensors: A review // *IEEE Sensors J.* 2021. Vol. 21. N 17. P. 01.
8. *Ambhorkar P., Wang Z., Ko H., Lee S., Koo K.-I.* et al. Nanowire-based biosensors: From growth to applications // *Micromach.* 2018. Vol. 9. P. 679.
9. *Zhu J., Liu X., Shi Q., He T., Sun Z.* et al. Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS // *Micromach.* 2020. Vol. 11. P. 7.
10. *Gordillo J.M.S., Morata A., Sierra C.D., Salleras M., Fonseca L., Tarancón A.* Recent advances in silicon-based nanostructures for thermoelectric applications // *APL Mater.* 2023. Vol. 11. P. 040702.
11. *Leitis A.F., Tseng M.L., John-Herpin A., Kivshar Y.S., Altug H.* Wafer-scale functional metasurfaces for mid-infrared photonics and biosensing // *Adv. Mater.* 2021. Vol. 33. P. 2102232.

12. *Blauw M.A., Zijlstra T., van der Drift E.* Balancing the etching and passivation in time-multiplexed deep dry etching of silicon // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2001. Vol. 19. N 6. P. 2930.
13. *Wu B., Kumar A., Pamarthy S.* High aspect ratio silicon etch: A review // *J. Appl. Phys.* 2021. Vol. 108. N 5. P. 051101.
14. *Шумилов А.С., Амиров И.И.* Моделирование формирования глубоких канавок в кремнии в плазмохимическом, циклическом травление/пассивация процессе // *Микроэлектроника.* 2007. Т. 36. № 4. С. 277–287.
15. *Gerlt M.S., Läubl N.F., Manser M., Nelson Bradley J., Dual Jürg.* Reduced etch lag and High aspect ratios by deep reactive ion etching (DRIE) // *Micromach.* 2021. Vol. 12. P. 542.
16. *Lai S.L., Johnson D., Westerman R.* Aspect ratio dependent etching lag reduction in deep silicon etch processes // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 2006. Vol. 24. P. 1283–1288.
17. *Морозов О.В., Амиров И.И.* Аспектнонезависимое, анизотропное травление кремния в плазмохимическом, циклическом процессе // *Микроэлектроника.* 2007. Т. 36. № 4. С. 306–315.
18. *Шумилов А.С., Амиров И.И.* Механизм формирования микроигл на поверхности кремния во фторсодержащей плазме в циклическом травление/осаждение процессе // *Химия высоких энергий.* 2008. Т. 42. № 5. С. 446–450.
19. *Уваров И.В., Морозов О.В., Аминов М.К., Изюмов М.О., Лемехов С.С., Куприянов А.Н., Козлов А.Н., Амиров И.И.* Анализ изготовления чувствительного элемента микроакселерометра // *Изв. вузов. Электроника.* 2016. Т. 21. № 5. С. 448–456.
20. *Морозов О.В., Постников А.В., Уваров И.В., Козин И.А., Соловьев А.В., Тарасов А.Н.* Изготовление кремниевого чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа // *Наноинженерия.* 2012. Т. 2. Вып. 8. С. 12–18.
21. *Морозов О.В., Постников А.В., Амиров И.И., Кальнов В.А.* Изготовление микроэлектромеханических устройств на основе технологии формирования изолированных блоков в пластине кремния // *Нано- и микросистемная техника.* 2012. № 7. С. 15–19.
22. *Morozov O., Postnikov A., Amirov I.* Oxidized bridges technology for suspended MEMS fabrication using standard silicon wafer // *Microsyst. Technol.* 2015. Vol. 21 (3).
23. *Knickerbocker J.U., Andry P.S., Dang B., Horton R.R., Interrante M.J.* et al. Three dimensional silicon integration // *IBM J. RES. & DEV.* 2008. Vol. 52. P. 6.
24. *Motoyoshi M.* Through-Silicon Via (TSV) // *Proc. IEEE.* 2009. Vol. 97. N 1. P. 43–48.
25. *Gambino J.P., Adderly S.A., Knickerbocker J.U.* An overview of through-silicon via technology and manufacturing challenges // *Microelectron. Eng.* 2015. Vol. 135. P. 73–106.
26. *Park J.S., Kang D.-H., Kwak S.M., Kim T.S., Park J.H.* et al. Low-temperature smoothing method of scalloped DRIE trench by post-dry etching process based on SF<sub>6</sub> plasma // *Micro- and Nano System. Lett.* 2022. Vol. 10. P. 12.
27. *Gao F., Yinen S., Kainlauri M., Kapulainen M.* Smooth silicon sidewall etching for waveguide structures using a modified Bosch process // *J. Micro/Nanolith. MEMS/MOEMS.* 2014. Vol. 13(1). P. 013010.
28. *Kim T., Lee J.* Optimization of deep reactive ion etching for microscale silicon hole arrays with high aspect ratio // *Micro- and Nano System. Lett.* 2022. Vol. 10. P. 12.
29. *Yeom J., Wu Y., Selby J. C., Shannon M.A.* Maximum achievable aspect ratio in deep reactive ion etching of silicon due to aspect ratio dependent transport and the microloading effect // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2005. Vol. 23. N 6. P. 2319–2329.
30. *Abdolvand R., Ayazi F.* An advanced reactive ion etching process for very high aspect-ratio sub-micron wide trenches in silicon // *Sensors, Actuators A.* 2008. Vol. 144. P. 109–116.
31. *Amirov I.I.* Plasma chemical etching of high-aspect-ratio silicon micro- and nanostructures. *Russian J. General Chemistry.* 2015. Vol. 85. N 5. P. 1252–1259.
32. *Tang Y., Sandoughsaz A., Owen K.J., Najafi K.* Ultra deep reactive ion etching of high aspect-ratio and thick silicon using a ramped-parameter process // *J. Microelectromech. Syst.* 2018. Vol. 27(4). P. 686.
33. *Shi Z., Jefimovs K., Romano L., Stampanoni M.* Towards the fabrication of high-aspect-ratio silicon gratings by deep reactive ion etching // *Micromachin.* 2020. Vol. 11. P. 864.
34. *Goodwin M.J., Harteveld C.A.M., de Boer M.J., Vos W.L.* Deep reactive ion etching of cylindrical nanopores in silicon for photonic crystals // *Nanotechnol.* 2023. Vol. 34. P. 225301.