

УДК 66.088

Особенности процесса глубинного анизотропного травления кремния в технологии изготовления траншейных МОП-транзисторов

А. Е. Ануров, Ю. М. Заботин, С. Г. Подгородецкий

АО «Российские космические системы»

e-mail: anurov_aleksey@mail.ru

Аннотация. В докладе рассмотрены особенности травления траншей для формирования затвора в технологии изготовления вертикальных силовых МОП-транзисторов и представлены зависимости геометрии траншей от параметров травления. Показано, что пропорциональное изменение расходов газов не оказывает существенного влияния на режим травления и вид траншей, а соотношение времени травления и осаждения пассивации сильно влияет на наклон стенок транча и шероховатость дна.

Ключевые слова: глубинное реактивное ионное травление (ГРИТ), вертикальные силовые МОП-транзисторы, Bosch-процесс, технология trenchMOS

Specifics of Silicon Deep Anisotropic Etching in Trench MOSFET Manufacturing Technology

A. E. Anurov, Yu. M. Zabotin, S. G. Podgorodetsky

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: anurov_aleksey@mail.ru

Abstract. Operation of gate trench etching for vertical power MOSFET manufacturing technology is considered and investigation results are shown as dependences of trench geometry from etch parameters and as parameters of the final etch regime in this paper. It is shown that gas flows' proportional change has a little effect on the etch regime and the trench form, and etch time to deposition time ratio has a strong influence on the wall slope and the bottom roughness.

Key words: deep reactive ion etching (DRIE), vertical power MOSFET, Bosch-process, trenchMOS technology

1. Введение

Плазменные методы формирования микро- и наноструктур на основе плазмохимических процессов травления и осаждения являются ключевыми в технологии микро- и нанoeлектроники. Формирование высокоаспектных ($A > 10$) и сверхвысокоаспектных ($A > 50$) микроструктур с высокоанизотропным профилем в кремнии необходимо для создания высокочувствительных инерционных датчиков, микроконденсаторов и других приборов, а также для траншейной технологии (trenchMOS) изготовления МОП-транзисторов. Среди плазменных процессов травления наибольшее распространение получил Bosch-процесс благодаря конструктивной простоте оборудования по сравнению с крио-процессом и лучшими параметрами травления по сравнению со смешанным процессом травления [1]. Таким образом, оптимизация Bosch-процесса травления, как одной из операций, влияющих на выходные параметры МОП-транзисторов, является актуальной задачей.

Цель работы — исследование Bosch-процесса глубинного травления кремния в технологии изготовления МОП-транзисторов.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ принципа действия, областей применения и технологии изготовления МОП-транзисторов;
- провести анализ физических основ плазмохимического травления (ПХТ) и технологии формирования отверстий в кремнии;
- исследовать особенности глубинного анизотропного травления кремния в технологии изготовления МОП-транзисторов.

2. Анализ принципа действия МОП-транзисторов

Большинство современной цифровой электроники построено на полевых МОП-(метал-окисел-полупроводник) транзисторах, как более экономичных, по сравнению с биполярными транзисторами. Иногда МОП-транзисторы называют МДП (металл-диэлектрик-полупроводник). Международный

термин таких транзисторов — MOSFET (*metal-oxide-semiconductor field effect transistor*). Существуют n -канальные и p -канальные МОП-транзисторы (рис. 1) [2].

На рис. 1 представлен транзистор с затворами, расположенными вертикально в канавках-трэнчах.

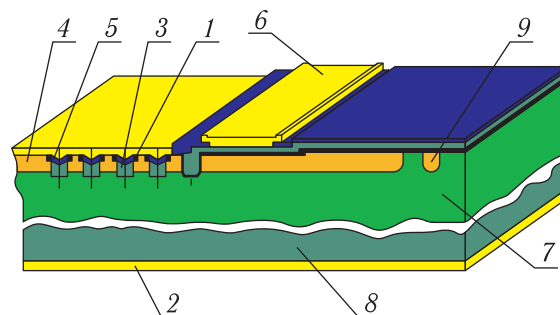


Рис. 1. Силовой вертикальный МОП-транзистор

На рис. 1 отмечены три контакта транзистора: исток — 1, сток — 2 и затвор — 6. Транзистор сформирован в эпитаксиальной структуре, состоящей из подложки 8, на которой выращен высокоомный эпитаксиальный слой 7. В качестве подложки используются пластины низкоомного кремния кристаллографической ориентации (100). Так как после окончательного формирования структуры для уменьшения последовательного сопротивления структура утоняется, подлегирование тыльной стороны нецелесообразно. В качестве материала подложки используются пластины, легированные мышьяком с удельным сопротивлением $0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. В эпитаксиальном слое 7 диффузией или эпитаксией формируется область p -типа 4. Таким образом, получается диодная структура с p - n -переходом, состоящая из слоев 4, 7, 8. Для того чтобы при обратном смещении не было пробоя по периметру диодной структуры, на рисунке приведен вариант расширения области пространственного заряда с помощью охранного кольца 9. Канавки затворов заполнены легированным поликристаллическим кремнием и изолированы от области 4 тонким слоем (50–100 нм) диоксида кремния 5. Исток 1 обычно заземлен, на сток 2 подается смещение, диодная структура в результате заперта. При подаче на контакт затвора 6 положительного смещения вдоль поверхности диоксида кремния имеет место инверсия проводимости и транзистор открывается.

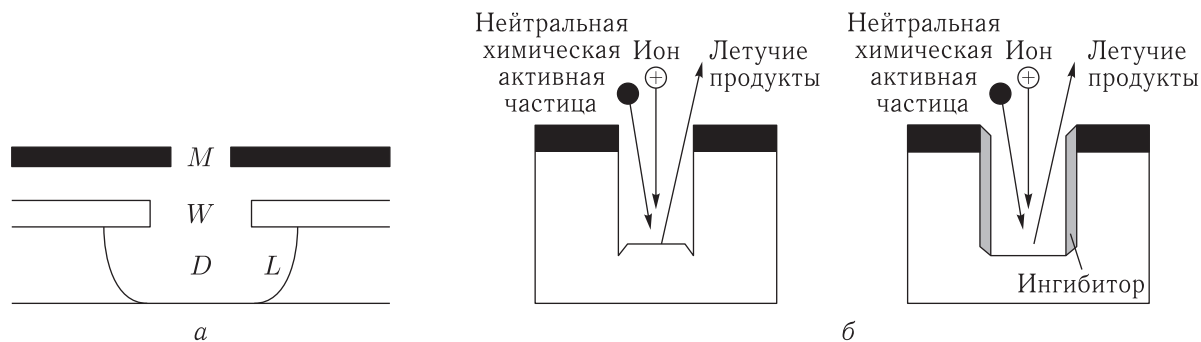


Рис. 2. Профиль травления, получаемый при: а — изотропном ПХТ, б — реактивном ионном травлении [2]

Для того чтобы обеспечить качественную работу транзистора, необходимо обеспечить целый ряд условий. Прежде всего, чем выше плотность канавок-тренчей на единицу поверхности, тем ниже сопротивление транзистора, соответственно, меньше потери мощности. Поэтому шаг канавок (питч) должен быть минимальным. Необходимо также обеспечить расширение области пространственного заряда (ОПЗ) по контуру диффузионной области на периферии транзистора, чтобы исключить пробой вследствие сужения ОПЗ.

3. Анализ физических основ плазмохимического травления (ПХТ) и технологии формирования отверстий в кремнии

ПХТ кремния позволяет формировать как изотропные, так и анизотропные, высокоаспектные профили (рис. 2) [2].

Bosch-процесс ПХТ — циклический процесс, состоящий из двух этапов. Первый этап — этап травления, при котором ионы фтора плазмы, сформированной из газа SF_6 , вступают в реакцию с кремнием, образуя газообразное соединение SiF_4 , которое откачивается из системы вакуумными насосами. Травление происходит изотропно. За этапом травления следует этап пассивации. На этом этапе плазма создается из газа C_4F_8 . Ионы C_4F_8 формируют полимер, схожий с тефлоном, который осаждается на поверхность образца. Этот полимер не вступает в реакцию с травящей плазмой и обеспечивает защиту от дальнейшего травления

для кремния, который находится под ним. Перед следующим этапом травления этот полимер необходимо удалить со дна протравленной канавки. Для этого используются ионы, которые под действием электрического поля движутся практически по нормали ко дну канавки и выбивают полимер с поверхности. Таким образом, полимер удаляется только со дна, а стенки канавки остаются защищенными от травления. Дальнейшее чередование процессов травления и пассивации позволяет анизотропно протравить кремний до желаемой глубины (рис. 3) [2].

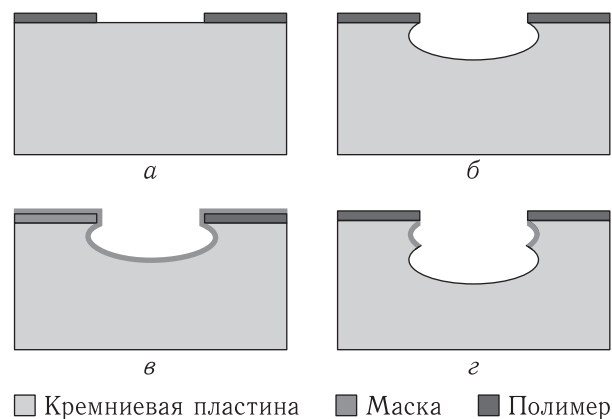


Рис. 3. Bosch-процесс травления кремния: а) образец с маской, б) первый шаг травления, в) шаг осаждения, г) второй шаг травления [2]

Преимущества Bosch-процесса:

– в отличие от жидкостного травления, травление производится анизотропно, независимо от кристаллографических плоскостей обрабатываемого объекта;

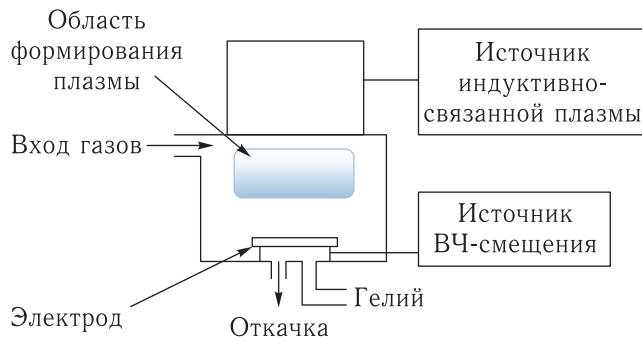


Рис. 4. Схема реактора установки SI 500

– размеры отверстия в маске практически совпадают с размерами входного и выходного отверстия в кремнии.

Недостаток Bosch-процесса:

– шероховатые стенки получаемых отверстий [2].

Процесс ПХТ кремниевых пластин проводили на установке плазмохимического травления в индуктивно-связанной плазме SI 500 PTSA Plasma Etcher производства SENTECH Instruments GmbH (Германия), в разряде индуктивно-связанной плазмы высокой плотности (13,56 МГц) на изолированном охлаждаемом (до -30°C) электроде при рабочих давлениях 4–5 Па [3, 4].

4. Особенности глубинного анизотропного травления кремния в технологии изготовления МОП-транзисторов

Объектами исследования являлись кремниевые пластины со сформированным на поверхности топологическим рисунком траншей МОП-транзисторов. Маска формировалась из фоторезиста марки Shipley толщиной 1,2–1,5 мкм. Заданные параметры траншей: глубина травления 5,5–6,5 мкм, шероховатость стенок ≤ 100 нм, шероховатость дна ≤ 10 нм.

Контроль геометрических размеров полученных структур проводили при помощи стилусной профилометрии, оптической микроскопии и растровой электронной микроскопии (РЭМ) (стилусный профилометр Alpha-Step D-100, исследовательский микроскоп Axiomager, растровый электронный микроскоп JCM 6000).

При оптимизации Bosch-процесса варьировались следующие параметры:

Q_{SF_6} , $Q_{\text{C}_4\text{F}_8}$ — расходы газов SF_6 , C_4F_8 , $\text{см}^3/\text{мин}$;

P_{E1} , P_{E2} — рабочее давление в камере на первом и втором шаге травления, Па;

P_D — рабочее давление в камере на шаге осаждения, Па;

W_{E1}^{RF} , W_{E2}^{RF} — мощность генератора ВЧ-смещения на первом и втором шаге травления, Вт;

W_D^{RF} — мощность генератора ВЧ-смещения на шаге осаждения, Вт;

W_{E1}^{ICP} , W_{E2}^{ICP} — мощность источника ИСП на первом и втором шаге травления, Вт;

W_D^{ICP} , Вт — мощность источника ИСП на шаге осаждения;

t_{E1} , t_{E2} — время первого и второго шага травления, с;

t_D , с — время шага осаждения;

$T_{эл}$ — температура электрода.

5. Результаты

Результаты травления траншей МОП-транзисторов стандартным режимом Bosch-процесса представлены на рис. 5. Травление наглядно демонстрирует наличие подтрав под маску и микроигл на стенках траншей.

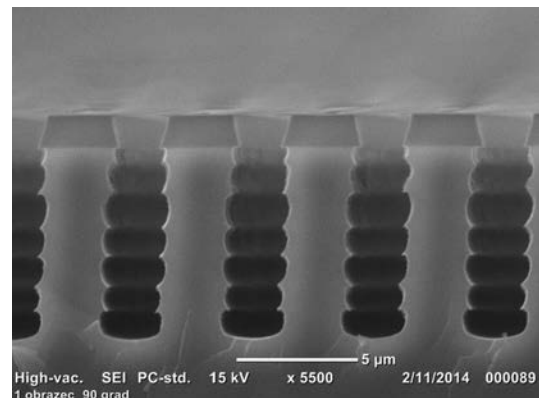


Рис. 5. Снимок РЭМ протравленных траншей

Согласно анализу литературы [5, 6, 7, 8]:

– основной причиной высокой шероховатости стенок является подтрав под маску;

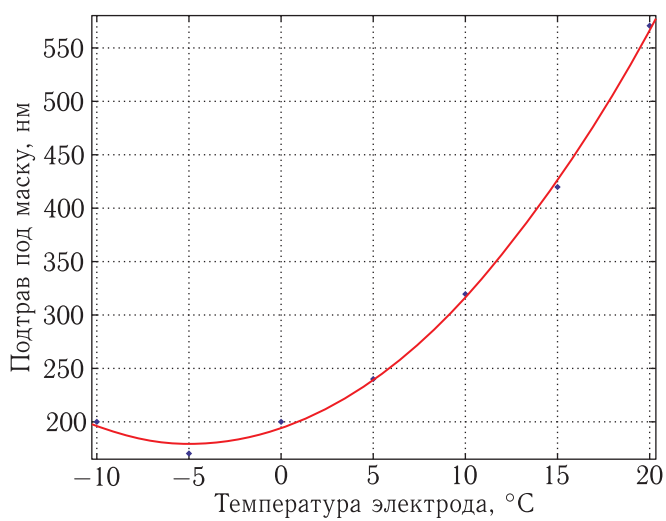


Рис. 6. Зависимость подтрав под маску от температуры электрода

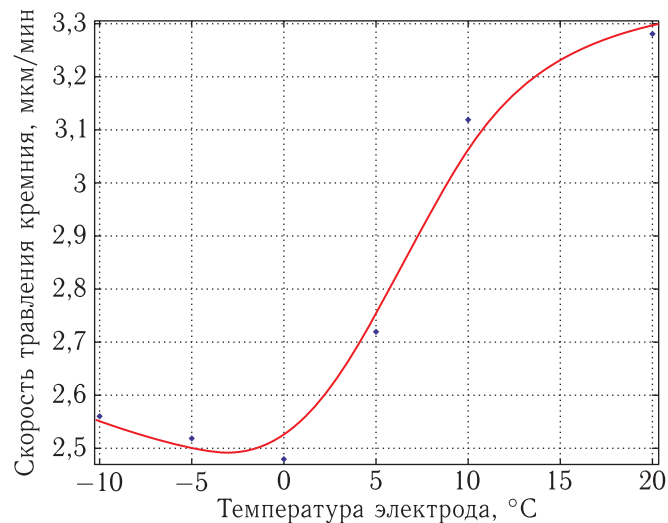


Рис. 7. Зависимость скорости травления кремния от температуры электрода

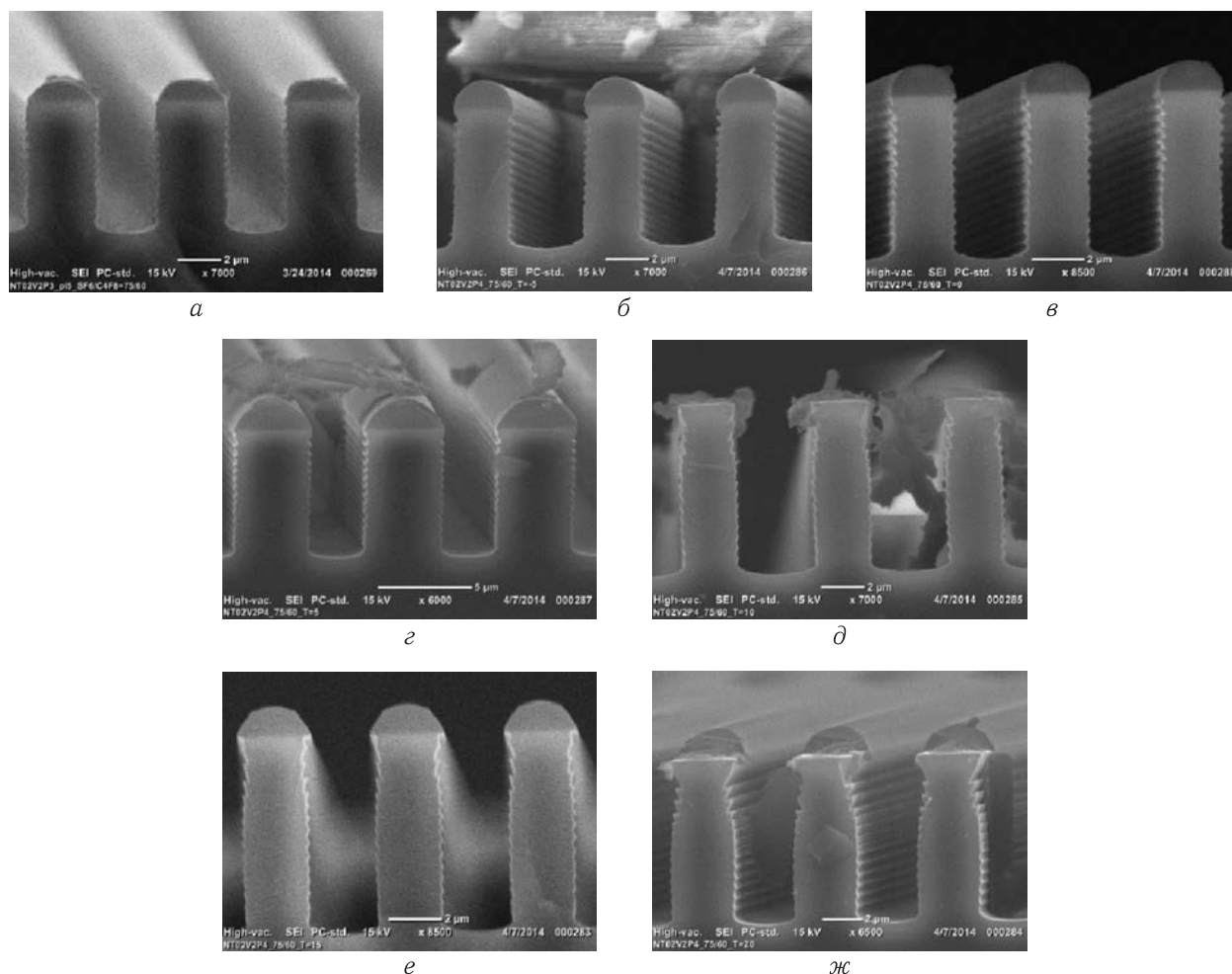


Рис. 8. Снимки РЭМ протравленных тренчей: а – $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, б – $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, в – $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, г – $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, д – $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, е – $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, ж – $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

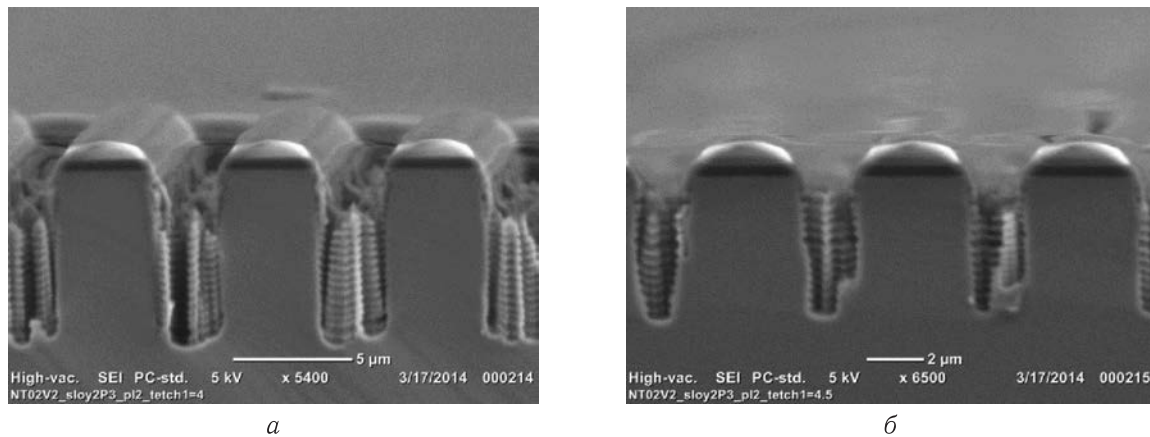


Рис. 9. Снимки РЭМ протравленных тренчей. Соотношение времени: а — 7/3, б — 6/3

– неровность дна проявляется в виде микроигл, которые являются следствием неравномерного травления пассивации.

В ходе выполнения работы получены следующие данные.

- При уменьшении температуры электрода с 20 °С до –10 °С наблюдалось уменьшение подтрав. Предполагается, что это вызвано ослаблением химической реакции между радикалами плазмы и стенками тренча, а также отсутствием десорбции полимера. Зависимость представлена на рис. 6.
- С ростом температуры электрода наблюдается рост скорости травления, зависимость представлена на рис. 7.
- Скорость травления кремния возрастает с температурой. На рис. 8 приведены снимки РЭМ, соответствующие экспериментальным точкам на графике.
- Соотношение времени травления и осаждения пассивационного слоя сильно влияет на наклон стенок тренча и на шероховатость дна. Уменьшение величины отношения времени первого шага травления к времени нанесения пассивации увеличивает угол наклона стенок тренча, а также размер шероховатости.
- Время первого шага травления влияет на образование микроигл на дне тренча. При времени травления ≥ 5 с микроиглы отсутствуют, что может быть вызвано полным снятием пассивации со дна тренча.

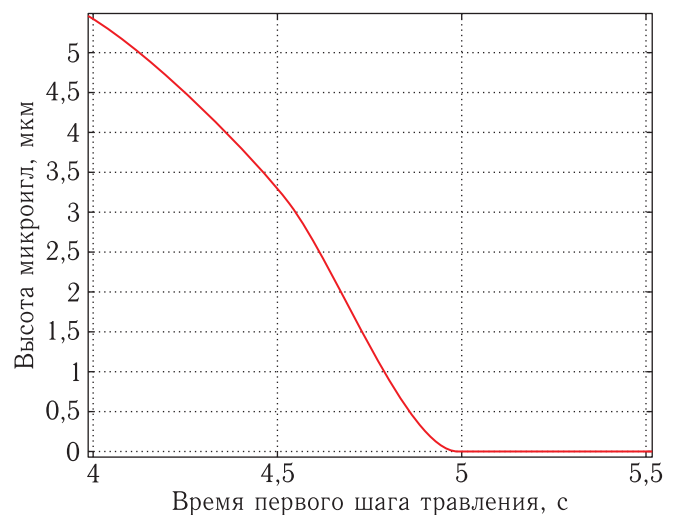


Рис. 10. Зависимости высоты микроигл от времени первого шага травления (время осаждения — 2 с, время второго шага травления — 1 с). Фотографии РЭМ, соответствующие экспериментальным точкам на графике, приведены на рис. 11

- Пропорциональное изменение расходов газов не оказывает существенного влияния на режим травления и вид получаемых тренчей (рис. 12).
- С увеличением мощности первого шага травления с 25 до 100 В скорость травления возрастает, со 100 до 150 В рост скорости травления сильно замедляется.
- Подтрав под маску возрастает с увеличением мощности первого шага травления. Предполагается, что это вызвано увеличением энергии ионов и радикалов плазмы. Ниже приведены

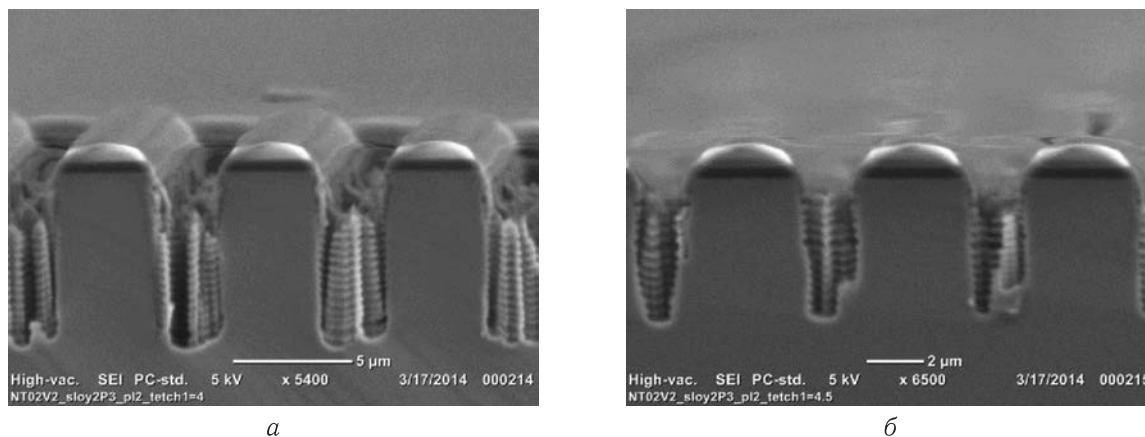


Рис. 11. Снимки РЭМ протравленных тренчей. Время первого шага травления: *а* — 4 с, *б* — 4,5 с

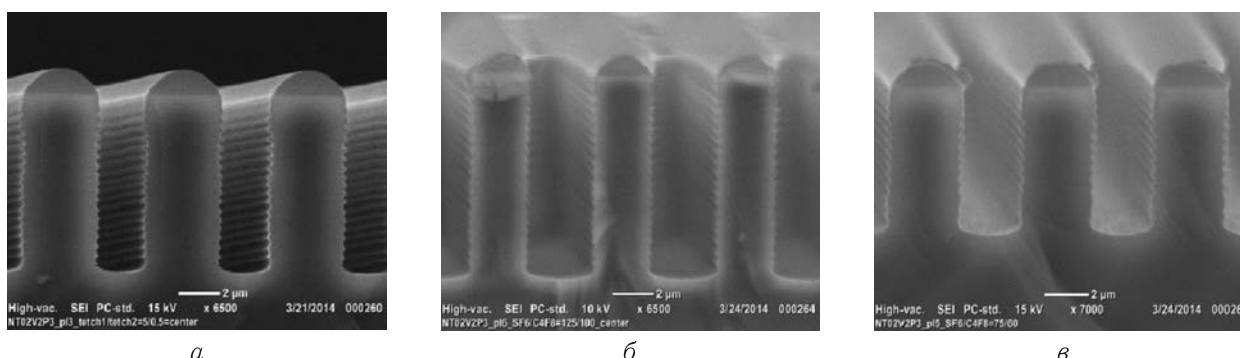


Рис. 12. Снимки РЭМ протравленных тренчей. Соотношение расходов газов: *а* — 250/200, *б* — 125/100, *в* — 75/60

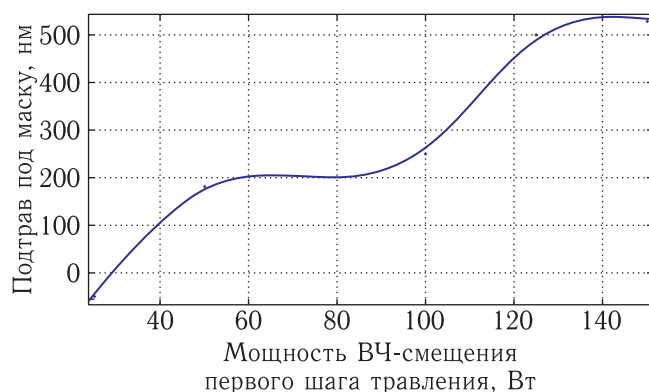


Рис. 13. Зависимость подтрав под маску от мощности ВЧ-смещения первого шага травления

фотографии РЭМ, соответствующие экспериментальным точкам на графике.

На основе приведенных выше наблюдений был выбран режим травления, соответствующий поставленным требованиям (глубина травления 5,5–6,5 мкм, шероховатость стенок ≤ 100 нм, шеро-

ховатость дна ≤ 10 нм). Вид полученных тренчей приведен на рис. 15.

6. Выводы

В работе рассмотрен принцип действия и области применения МОП-транзисторов. Показано, что МОП-транзистор имеет достаточно простое устройство и широко распространен в различных областях автоматики и электроники. Рассмотрен один из видов РИТ — Bosch-процесс.

Приведен результат подбора параметров Bosch-процесса (см. таблицу), удовлетворяющий поставленным требованиям (ширина канавки 2–3 мкм, глубина травления 5,5–6,5 мкм, шероховатость стенок ≤ 100 нм, шероховатость дна ≤ 10 нм). В дальнейшем планируется провести процесс травления для канавок шириной 330 нм, а также сквозное травление (глубина 380 мкм) чувствительного элемента (упругого подвеса) маятникового акселерометра.

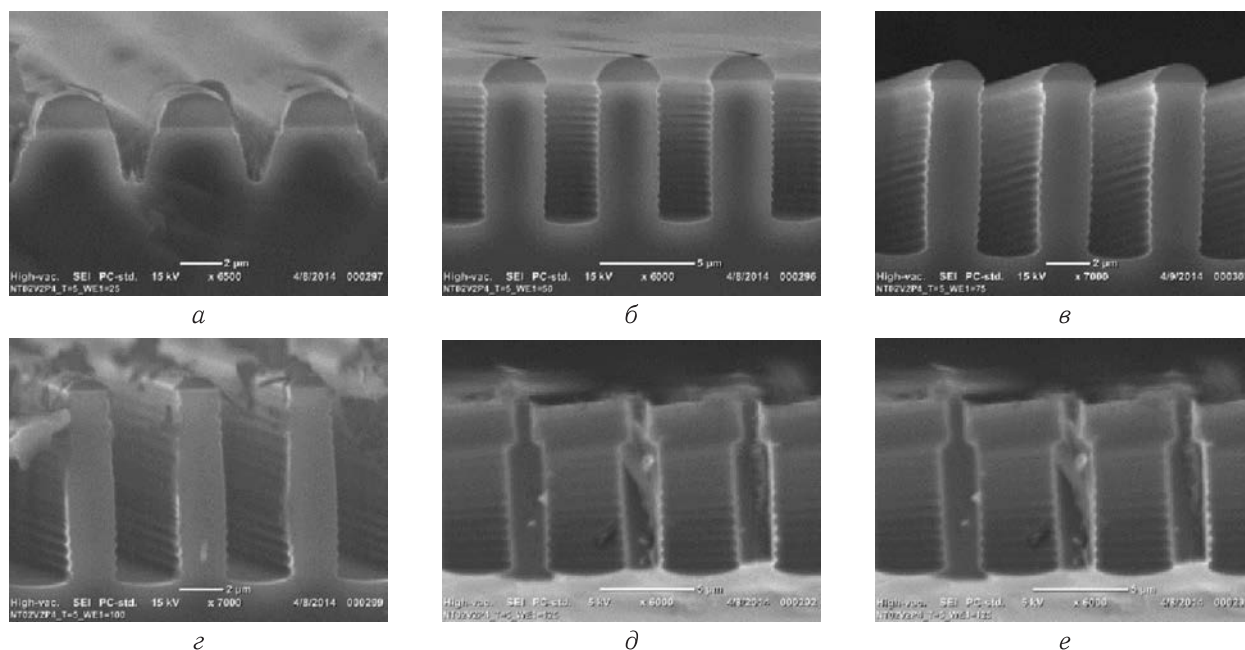


Рис. 14. Снимки РЭМ протравленных тренчей. Мощность первого шага травления: *а* — 25 Вт, *б* — 50 Вт, *в* — 75 Вт, *г* — 100 Вт, *д* — 125 Вт, *е* — 150 Вт

Т а б л и ц а. Параметры конечного режима травления кремния

Q_{SF_6} , см ³ /мин	$Q_{C_4F_8}$, см ³ /мин	P_{E1} , Па	P_{E2} , Па	P_D , Па	W_{E1}^{RF} , Вт	W_{E2}^{RF} , Вт	W_D^{RF} , Вт	t_{E1} , с	t_{E2} , с	t_{Dep} , с	$T_{эл}$, °C
75	60	4	4	5	35	0	5	4,8	0,3	3,5	5

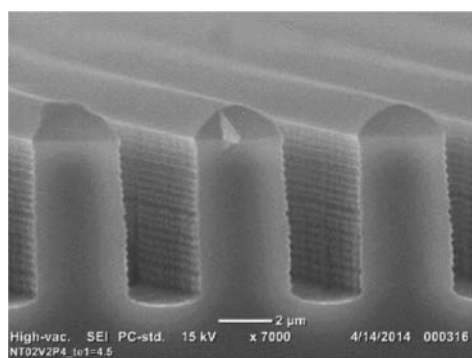


Рис. 15. Снимок РЭМ протравленных тренчей по конечному режиму

Список литературы

- Амиров И.И. Плазменные процессы формирования высокоаспектных структур для микро- и наномеханических устройств. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Ярославский филиал Учреждения Российской академии наук Физико-технологического института РАН, 2010.
- http://www.nanofab.ualberta.ca/wp-content/uploads/2009/05/bosch_simple.pdf
- <http://www.eavangard-semi.ru/si500>
- http://tudresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_elektrotechnik_und_informationstechnik/ihtm/news/semicon2013_talks/08_Gargouri_SENTECH
- Postnikov A. V., Amirov I. I., Naumov V. V., Kalnov V. A. Simulation, fabrication, and dynamics characteristics of electrostatically actuated switches // Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025.
- Walker M. J. Comparison of Bosch and cryogenic processes for patterning high aspect ratio features in silicon, Oxford Instruments Plasma Technology plc, North End, Yatton, Bristol, B549 4AP UK, 2001.
- Donohue L. A., Hopkins J., Barnett R., Newton A., Barker A. Developments in Si and SiO₂ Etching for MEMS based optical applications, Proc. SPIE 5347, Micromachining Technology for Micro-Optics and Nano-Optics II, 44 (January 24, 2004); doi:10.1117/12.524471.
- http://www.nanofab.ualberta.ca/wp-content/uploads/2009/03/primer_deepsiliconrie.pdf