



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013102776/28, 23.01.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
23.01.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.01.2013

(45) Опубликовано: 20.07.2014 Бюл. № 20

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: US 6841466 B1, 11.01.2005. US 6420258 B1, 16.07.2002. US 5635423 A, 03.06.1997. US 6140238 A, 31.10.2000. US 6180523 B1, 30.01.2001. US 8293635 B2, 23.10.2012. RU 2420827 C1, 20.06.2011. RU 2230391 C2, 10.06.2004

Адрес для переписки:

124460, Москва, Зеленоград, 1-й Западный пр-д,  
12, стр. 1, ОАО "НИИМЭ"

(72) Автор(ы):

Данила Андрей Владимирович (RU),  
Гущин Олег Павлович (RU),  
Красников Геннадий Яковлевич (RU),  
Бакланов Михаил Родионович (RU),  
Гвоздев Владимир Александрович (RU),  
Бурякова Татьяна Леонтьевна (RU),  
Игнатов Павел Викторович (RU),  
Аверкин Сергей Николаевич (RU),  
Янович Сергей Игоревич (RU),  
Тюрин Игорь Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники" (ОАО "НИИМЭ"), Российская Федерация (RU)

## (54) СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ МЕДНЫХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛЬФРАМОВОЙ ЖЕСТКОЙ МАСКИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к технологии изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС) в части формирования многоуровневых металлических соединений. Способ формирования многоуровневых медных межсоединений СБИС по процессу двойного Дамасцена через двухслойную жесткую маску включает нанесение слоя изолирующего диэлектрика на пластину, в теле которого будут формироваться проводники многоуровневой металлизации интегральной схемы, нанесение поверх изолирующего диэлектрика нижнего слоя двухслойной жесткой маски двуокиси кремния и верхнего слоя двухслойной жесткой маски, формирование на верхнем слое двухслойной жесткой маски топологической маски из резиста, травление верхнего слоя двухслойной жесткой маски по топологической маске из резиста, удаление остаточного резиста с поверхности

топологического рисунка, сформированного в верхнем слое двухслойной жесткой маски, травление нижнего слоя двухслойной жесткой маски двуокиси кремния по топологическому рисунку верхнего слоя двухслойной жесткой маски, вытравливание траншей и переходных контактных окон в слое изолирующего диэлектрика по топологическому рисунку в двухслойной жесткой маске, заполнение сформированных траншей и переходных контактных окон слоем металлизации и удаление избыточного объема нанесенного металла с поверхности пластин, при этом в качестве материала верхнего слоя жесткой маски используют слой вольфрама. Изобретение обеспечивает повышение надежности и увеличение процента выхода годных изделий. 1 з.п.ф-лы, 10 ил.



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*H01L 21/768* (2006.01)  
*B82B 3/00* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2013102776/28, 23.01.2013  
(24) Effective date for property rights:  
23.01.2013  
Priority:  
(22) Date of filing: 23.01.2013  
(45) Date of publication: 20.07.2014 Bull. № 20  
Mail address:  
124460, Moskva, Zelenograd, 1-j Zapadnyj pr-d, 12,  
str. 1, OAO "NIIMEh"

(72) Inventor(s):  
Danila Andrej Vladimirovich (RU),  
Gushchin Oleg Pavlovich (RU),  
Krasnikov Gennadij Jakovlevich (RU),  
Baklanov Mikhail Rodionovich (RU),  
Gvozdev Vladimir Aleksandrovich (RU),  
Burjakova Tat'jana Leont'evna (RU),  
Ignatov Pavel Viktorovich (RU),  
Averkin Sergej Nikolaevich (RU),  
Janovich Sergej Igorevich (RU),  
Tjurin Igor' Alekseevich (RU)  
(73) Proprietor(s):  
Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo "Nauchno-  
issledovatel'skij institut molekularnoj  
ehlektroniki" (OAO "NIIMEh"), Rossijskaja  
Federatsija (RU)

(54) **FORMING OF MULTILEVEL COPPER INTERCONNECTIONS OF MICRO IC WITH APPLICATION OF TUNGSTEN RIGID MASK**

(57) Abstract:  
FIELD: metallurgy.  
SUBSTANCE: method comprises the process of dual Damascene ICs formation through duplex rigid mask including application of insulation dielectric ply on the plate, conductors of IC multilevel metallisation being formed in dielectric body. Bottom and top layers of silicon dioxide rigid mask are applied over said insulation dielectric. Topological mask of resist is formed on top ply of duplex rigid mask to etch said top ply by said topological mask. Residual resist is removed from the surface of topological pattern formed in top layer of duplex rigid mask. Bottom layer of duplex silicon

dioxide rigid mask is etched by topological patter of said top ply of duplex rigid mask. Trenches and transition contact plies are etched in every insulation dielectric ply by topological patter in duplex rigid mask. Formed trenches and transition contact openings are filled with metallisation ply and removal of residual volume of applied metal from the plate surface. Note here that tungsten ply is used as the material of rigid mask top ply.  
EFFECT: higher reliability and yield.  
2 cl, 10 dwg

RU 2 523 064 C1

RU 2 523 064 C1

## Область техники

Изобретение относится к технологии изготовления полупроводниковых приборов и сверхбольших интегральных схем (СБИС) в части формирования многоуровневых металлических соединений.

## 5 Уровень техники

Уровень современной микроэлектроники определяется степенью интеграции элементов в едином приборе и/или на отдельном полупроводниковом кристалле микросхемы. Степень интеграции напрямую зависит от минимальных размеров элементов и расстояний между ними. Сложность современных интегральных схем  
10 такова, что для организации электрического соединения миллионов элементов требуется много уровней металлических соединений с поперечными размерами проводников, сравнимыми с минимальными размерами элементов порядка десятка нанометров. Уменьшая шаг разводки и добавляя последовательные проводящие слои, многоуровневая металлизация удовлетворяет потребностям более высокоплотных  
15 схем (V. Agarwal, M.S. Hrishikesh, S.W. Keckler and D. Burger, Clock rate versus IPC: the end of the road for conventional microarchitectures. Proceedings of the International Symposium on Computer Architecture, pp.248-259, 2000.) Доступное число металлических слоев утроилось за прошлые 10 лет так, что текущие технологии (уровня 90-180 нм) имеют 6-10 уровней. При этом для снижения электрических потерь требуется использовать в качестве  
20 проводников материалы с высокой проводимостью, а для изоляции - слои диэлектрических материалов с минимально возможным коэффициентом диэлектрической проницаемости, так называемыми low-k диэлектриками.

В настоящее время в производстве СБИС в качестве основного материала проводников многоуровневых металлических соединений используются алюминий и  
25 медь. Медь, как правило, используется в СБИС с проектными нормами 130 нм и менее. Связано это с тем, что с уменьшением сечения проводников и расстояния между проводниками, которые непосредственно зависят от линейных размеров элементов, начинает существенно возрастать сопротивление электрической разводки и электрические емкости близко расположенных проводников. Это увеличивает задержки  
30 распространения сигналов в СБИС и потери мощности. Переход от алюминиевых проводников в структуре СБИС на медные обусловлен более низким удельным сопротивлением меди по сравнению с алюминием. Переход на использование меди потребовал изменения технологического процесса формирования проводников. Так как медь не образует летучих соединений с температурами кипения или возгонки,  
35 совместимыми с полупроводниковой технологией, использовать традиционные промышленные технологии сухого травления через фоторезистивную маску не представляется возможным. Поэтому был разработан процесс Дамасцен (в русской литературе уже утвердилось такое название (damascene), в котором в диэлектрическом слое вытравливается траншея будущего проводника, которая затем заполняется медью,  
40 создавая таким образом электрическое соединение элементов. Этот процесс в общем случае включает в себя стадии:

- формирование слоя диэлектрика, которым проводник будет окружен с боковых сторон;
- формирование маски для вытравливания траншеи в слое диэлектрика;
- 45 - вытравливание траншеи в слое диэлектрика;
- нанесение барьерного слоя для предотвращения взаимодействия меди с окружающими материалами и деградации последних;
- нанесение зародышевого слоя для последующего осаждения меди;

- электрохимическое осаждение меди с заполнением траншей;  
 - химико-механическая полировка меди, удаляющая осажденный слой меди с поверхности осажденного слоя диэлектрика и оставляющая медь внутри вытравленных траншей, формирующих проводники электрической разводки соответствующего уровня микросхемы.

Помимо этого, для формирования не только проводников одного уровня, но и контактов через переходные окна к нижележащему уровню электрической разводки процесс Дамасцен был модифицирован и получил название Двойной Дамасцен (dual damascene). Таким образом, в одном уровне разводки формируются траншеи (позиция 95 Фиг.1) и переходные контактные окна (позиция 94 Фиг.1) (United States Patent 5635423, Simplified dual damascene process for multi-level metallization and interconnection structure. 1997).

В КМОП технологии, основные параметры которой изложены в международной дорожной карте полупроводников (ITRS), для уровня 45 нм и ниже предусмотрено использование диэлектрика low-k с коэффициентом диэлектрической проницаемости в диапазоне от 2,3 до 2,9 для первого уровня металла (ITRS Edition Reports and Ordering. Interconnect 2010 tables. 2010) (Таблица 1)

DRAM 1/2 шаг (нм)	51,69	45,00	40,09	35,72	31,82	28,35	25,26	22,50	20,05	17,86	15,91	14,17
MPU/ASIC Металл 1/2 шаг (нм)	53,51	45,00	37,84	31,82	26,76	23,84	21,24	18,92	16,86	15,02	13,38	11,92
Межуровневый диэлектрик - коэффициент диэлектрической проницаемости (k)	2,9-3,3	2,6-2,9	2,6-2,9	2,6-2,9	2,4-2,8	2,4-2,8	2,4-2,8	2,1-2,5	2,1-2,5	2,1-2,5	2,0-2,3	2,0-2,3
Межуровневый диэлектрик - коэффициент диэлектрической проницаемости (k)	2,5-2,8	2,3-2,6	2,3-2,6	2,3-2,6	2,1-2,4	2,1-2,4	2,1-2,4	1,9-2,2	1,9-2,2	1,9-2,2	1,7-2,0	1,7-2,0

Такой коэффициент диэлектрической проницаемости в современном уровне развития материаловедения достигается только у диэлектриков из пористых материалов.

В ближайшем аналоге для формирования проводников и контактов в пористом low-k диэлектрике используется маршрут двойного Дамасцена (United States Patent US 2010/0022091. Method for plasma etching porous low-k dielectric layer. 2010). Однако возникают некоторые сложные проблемы в процессе интеграции диэлектрических материалов с пористой структурой в маршрут двойного Дамасцена. Травление в плазме, последующее затем удаление фоторезиста и очистка пористых материалов от полимеров в узких структурах изменяют свойства пористого материала, которые влияют на электрические свойства и свойства надежности (К. Маех, M.R. Baklanov, D. Shamiryan, F. Iacopi, S.H. Brongersma, Z.S. Yanovitskaya. Low dielectric constant materials for microelectronics J. Appl. Phys. 93 (2003) 8793).

Существует два типа масок для формирования топологического рисунка в low-k материале: мягкая маска (фоторезист) и жесткая маска (неорганические материалы). Технология с использованием фоторезистивной маски достаточно проста, поскольку не требует осаждения и удаления дополнительных слоев, кроме фоторезиста и органического антиотражающего покрытия (ARC), разделяющего фоторезист и стек снизу. В случае применения жесткой маски она осаждается сверху на low-k, диэлектрик, а затем наносятся ARC и фоторезист. Процесс плазменного травления делится на 4 этапа: (1) вскрытие ARC, (2) травление жесткой маски, (3) очистка от фоторезиста/ARC, и (4) травление low-k диэлектрика через жесткую маску.

Несмотря на то что процесс с использованием резистивной маски является предпочтительным с точки зрения затрат, однако он имеет ряд существенных

недостатков. Для органических low-k полимеров резистивная маска исключается, так как материал, подлежащий травлению, и материал резистивной маски принадлежат к одному классу материалов: органические полимеры. Таким образом, селективность травления low-k диэлектрика к резистивной маске очень мала и при последующей  
 5 очистке от полимеров плазма растравит low-k диэлектрик также быстро, как и удалит фоторезист. Таким образом, для формирования структур из органических полимеров жесткая маска является абсолютным требованием.

Для гибридных материалов на основе диоксида кремния резистивная маска может быть использована не всегда. В связи с различной природой резистивной маски и low-  
 10 k диэлектрика, основной частью состава которого являются SiOCH-группы (строго говоря, не совсем иной, поскольку SiOCH в своем составе также содержит отдельные СН<sub>3</sub> углеводородные группы), есть, тем не менее, условия, при которых селективность травления SiOCH к резистивной маске позволяет сформировать заданную топологическую структуру контакта.

Процесс последующего удаления резистивной маски должен быть оптимизирован таким образом, чтобы не повредить low-k материал, так как гидрофобность SiOCH  
 15 материалов зависит именно от наличия -СН<sub>3</sub> групп, в то время как плазма, используемая для удаления резиста, также удаляет с поверхности low-k материала эти углеводородные группы. Уже в технологии 65 нм невозможно игнорировать повреждения поверхности  
 20 и боковой стенки траншеи, вызванные плазмой для удаления резиста. Дальнейшее снижение критических размеров (CD) приносит две новые задачи: во-первых, толщина резиста должна быть уменьшена, чтобы обеспечить требуемое разрешение, во-вторых, узкие линии не допускают глубоких повреждений боковых стенок.

На основании вышеизложенного жесткая маска может рассматриваться как  
 25 единственный жизнеспособный вариант для формирования SiOCH low-k диэлектриков для технологий ниже 45 нм (Mikhail R. Baklanov, Jean-Francois de Marneffe, Denis Shamiryan, Adam M. Urbanowicz, Hualiang Shi, Tatyana V. Rakhimova, Huai Huang and Paul S. Ho. Plasma processing of low-k dielectrics. J. Appl. Phys. 112, 000000 (2012)).

Существует два основных типа жестких масок: диэлектрические и металлические.  
 30 Диэлектрические жесткие маски могут быть на основе кремния (SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> или SiC) или на основе углерода (аморфного углерода). Металлические жесткие маски обычно состоят из нитридов металлов, это TaN или TiN. Оксиды металлов и кремния не очень хорошо подходят для травления органосиликатных стекол, потому что их осаждение  
 35 включает в себя использование кислородсодержащих окислителей и они могут привести к деградации low-k материала. Si-маски лучше всего подходят для органического полимера low-k, потому что они обладают высокой селективностью травления к low-k диэлектрику в плазме на основе H<sub>2</sub> или O<sub>2</sub>, что позволяет использовать относительно тонкие маски.

Для материалов SiOCH жесткая маска на основе Si нетехнологична (Фиг.2а), так как  
 40 оба материала low-k диэлектрика и жесткой маски содержат Si, из-за этого трудно достичь требуемой селективности травления, что приводит к эффектам огранки и скругления верхней части вскрываемого контакта (N. Posseme, T. David, M. Darnon, T. Chevolleau, O. Joubert. Impact of Hard Mask Composition and Etching Chemistry on Porous Ultra Low-k Material Modification. Int. Conf. Microelectron. Interfaces 2005). Низкая  
 45 селективность требует осаждения толстого слоя жесткой маски, что ухудшает разрешение процесса, а также увеличивает эффективное значение константы диэлектрической проницаемости k в структуре контакта, если оставить жесткую маску на поверхности low-k после процесса травления. Опять же удаление жесткой маски на

основе Si представляет собой проблему, поскольку она имеет состав, схожий с low-k диэлектриком.

Последние разработанные решения для формирования SiOCH включают  
 5 металлические жесткие маски и жесткие маски из аморфного углерода. В этом случае после удаления ARC металл жесткой маски, как правило, травится в плазме  $\text{HBr-Cl}_2$ , тогда как аморфный углерод, как правило, травится с помощью плазмы  $\text{N}_2\text{-O}_2$  или  $\text{N}_2\text{-H}_2$ .

Так как во время вскрытия ARC low-k материал защищен жесткой маской, на данном этапе возможно незначительное повреждение. Тем не менее необходимо соблюдать  
 10 осторожность при шаге вскрытия жесткой маски, особенно при использовании жесткой маски из аморфного углерода, в этом случае тонкая плотная пленка  $\text{SiO}_2$  или  $\text{SiC}$  может выступать в качестве эффективной защиты от диффундирующих радикалов. В случае металлической жесткой маски (например, TiN) при травлении low-k высокая селективность  $\text{SiOCH/TiN}$  достигается из-за того, что основным продуктом травления -  
 15  $\text{TiF}_4$  - имеет относительно низкую летучесть (температура кипения при атмосферном давлении  $284^\circ\text{C}$ ) по сравнению с  $\text{SiF}_4$  (температура кипения при атмосферном давлении -  $86^\circ\text{C}$ ). С этой точки зрения, TaN является менее предпочтительной, так как ее основным продуктом травления  $\text{TaF}_5$  более летучий, чем  $\text{TiF}_4$ . Кроме того, металл жесткой маски не способствует увеличению эффективного значения константы диэлектрической  
 20 проницаемости  $k$ , потому что жесткая маска удаляется процессами CMP после заполнения контакта металлом (M. Darnon, T. Chevolleau, D. Eon, L. Vallier, J. Torres, O. Joubert. Etching characteristics of TiN used as hard mask in dielectric etch process. J. Vac. Sci. Technol. В 24 (2006) 2262.).

Основными недостатками применения металлических жестких масок являются  
 25 металлсодержащие остатки травления, которые очень трудно удалить (Фиг.2b). Эффект микромаскирования вызван низколетучими продуктами травления TiN, которые переосаждаются на поверхности травимой структуры. Освобождение механических напряжений при использовании TiN может привести к серьезным искажениям (так называемая «волнистость») в полосах металла и low-k диэлектрика в узких линиях с  
 30 высоким аспектным соотношением сторон в процессе травления, что будет показано ниже.

Для интеграции пористых SiOCH диэлектриков в архитектуру двойного Дамасцена был разработан метод использования двухслойной жесткой маски для предотвращения  
 непосредственного воздействия на пористый диэлектрический материал плазмы  
 35 кислорода (O. Hinsinger, R. Fox, E. Sabouret, C. Goldberg, C. Verove, W. Besling, P. Brun, E. Josse, C. Monget, O. Belmont, J. Van Hassel, B.G. Sharma, J.P. Jacquemin, P. Vannier, A. Humbert, D. Brunei, R. Gonella, E. Mastromatteo, D. Rebert, A. Farcy, J. Muel. Demonstration of an extendable and industrial 300 mm BEOL integration for the 65-nm technology node. Int. Electron. Devices Meeting (2004)).

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому изобретению является  
 40 способ формирования многоуровневых медных межсоединений СБИС с использованием слоя нитрида титана в качестве жесткой маски (M. Darnon and T. Chevolleau, T. David, J. Ducote, N. Posseme, R. Bouyssou, F. Bailly, D. Perret, O. Joubert. Patterning of porous SiOCH using an organic mask: Comparison with a metallic masking strategy. J. Vac. Sci. Technol. В (28) №1, Jan/Feb 2010 149-156). Формирование траншей SiOCH выполнено с использованием жесткой маски из металлического TiN на подслое  $\text{SiO}_2$ .

Стек состоит из слоя  $\text{SiO}_2$  (TEOS) толщиной 40 нм, который наносят на пористый low-k диэлектрик перед осаждением 45 нм TiN металлической жесткой маски (Фиг.3).

Однако при травлении пористых low-k диэлектриков во фторуглеродной плазме через жесткую маску из TiN индуцируется образование энергонезависимых Ti осадков травления на основе побочного продукта, который получается в процессе переосаждения на боковых стенках траншеи и приводит к серьезным искажениям профиля (Фиг.4).

5 Переосаждение побочных продуктов на боковых стенках пористых low-k диэлектриков зависит от наличия слоя фоторезиста на поверхности TiN жесткой маски.

Рассмотрим следующие примеры:

1) Вскрыли TiN, затем удалили фоторезист со всей пластины, кроме одного участка, после чего протравили диэлектрический материал. Т.е. основная часть пластины протравлена через TiN жесткую маску и лишь один участок через TiN жесткую маску, защищенную фоторезистом (Фиг.5). На основной части пластины наблюдалось переосаждение продуктов после травления, при этом и часть пластины, закрытая фоторезистом, также была с осажденными продуктами. Причиной глобального эффекта осаждения продуктов является распыление TiN и переосаждение из газовой фазы.

15 2) Вскрыли TiN, затем удалили фоторезист с одного участка, после чего протравили диэлектрический материал. Т.е. основная часть пластины протравлена через TiN жесткую маску, защищенную фоторезистом, и лишь один участок через TiN жесткую маску без фоторезиста (Фиг.6). На основной части не было обнаружено переосаждения продуктов, кроме участка, не защищенного фоторезистом. Причиной локального эффекта осаждения частиц является распыление TiN с поверхности и переосаждение из газовой фазы.

Поскольку переосаждение побочных продуктов на боковых стенках пористых low-k диэлектриков зависит от наличия слоя фоторезиста на поверхности TiN жесткой маски в процессе формирования контакта, удаление фоторезиста необходимо после вскрытия low-k диэлектрика. Однако для пористого материала, как показали авторы (M. Darnon, T. Chevolleau, T. David, N. Posseme, J. Ducote, C. Licitra, L. Vallier, O. Joubert, J. Torres. Modifications of dielectric films induced by plasma ashing processes: Hybrid versus porous SiOCH materials. J. Vac. Sci. Technol. В 26, 1964 (2008)), происходит деградация low-k диэлектриков, подвергшихся экспозиции в плазме для удаления фоторезиста. Удаление в NH<sub>3</sub> и O<sub>2</sub> в плазме вызывает истощение углерода и поглощение влаги, материал low-k диэлектрика становится гидрофильным и его диэлектрическая константа сильно возрастает. Плазма CH<sub>4</sub> приводит к сильному истощению углерода (обеднение CH<sub>3</sub>) без поглощения влаги и образованию тонкого слоя углерода на поверхности. Материал low-k диэлектрика остается гидрофобным, диэлектрическая постоянная изменяется незначительно. В дальнейшем увеличение диэлектрической постоянной связано с захватом воды больше, чем с обеднением метильной группы. Материал low-k диэлектрика должен остаться гидрофобным.

Используя оптимизированный рецепт для травления пористого low-k диэлектрика (CF<sub>4</sub>/Ar), возможно формирование траншей шириной до 100 нм (M. Darnon and T. Chevolleau, T. David, J. Ducote, N. Posseme, R. Bouyssou, F. Bailly, D. Perret, O. Joubert. Patterning of porous SiOCH using an organic mask: Comparison with a metallic masking strategy. J. Vac. Sci. Technol. В (28) №1, Jan/Feb 2010 149-156). При меньших размерах наблюдается волнистость диэлектрических линий (Фиг.7). Явление волнистости линии объясняется выходом высоких остаточных напряжений нитрида титана, который деформирует менее жесткую линию пористого low-k диэлектрика. Представленные результаты показывают, что процесс формирования траншеи пористого low-k диэлектрика зависит от материала жесткой маски.

Скорость травления диэлектрических слоев на основе кремния во фторсодержащей

плазме практически линейно зависит от приложенного к образцу смещения. Это означает, что обрабатываемый образец специально подвергается достаточно интенсивной ионной бомбардировке для достижения приемлемых скоростей травления, что в свою очередь приводит не только к повышению скорости травления маски, но и  
 5 образованию развивающейся фаски на краю маскирующего покрытия (т.н. фасетирование маски). Этот эффект может вызвать преждевременный «снос» края маски (при низкой селективности или неправильном выборе толщины маски) и, как следствие, наклон профиля травления.

Представленные результаты показывают, что форма профиля сформированной  
 10 траншеи в пористом low-k диэлектрике, уровень загрязнения ее стенок и уровень обеднения поверхностных слоев полезными углерод-водородными группами зависит от выбора материала маски.

Раскрытие предлагаемого изобретения

Как было показано выше, при использовании жесткой маски из TiN при  
 15 формировании многоуровневых медных межсоединений СБИС возникает ряд проблем, влияющих на выход годной многоуровневой медной металлизации, а значит на выход годных СБИС в целом:

- Узкое технологическое окно процессов травления вследствие плохой летучести фторгалогенидов титана;
- 20 - Профиль травления бочкообразной формы из-за переосаждения продуктов из газовой фазы вследствие распыления TiN;
- Волнообразность узких и высоких линий из-за релаксации остаточных напряжений;
- Деградация low-k диэлектриков, подвергшихся экспозиции в плазме для удаления фоторезиста, при формировании топологического рисунка с использованием TiN  
 25 жесткой маски;
- Усложненность маршрута и его более дорогая реализация при формировании low-k диэлектрика через TiN жесткую маску, так как предварительное травление слоя самой жесткой маски TiN и последующее травление через нее подслоя SiO<sub>2</sub>, а затем low-k диэлектрика необходимо осуществлять в разных реакторах. Это связано с тем, что  
 30 травление TiN осуществляется, как правило, в плазме на основе хлора, а травление диэлектриков в плазме на основе, фтор- и углеродсодержащих соединений.

Целью настоящего предлагаемого изобретения является повышение надежности и увеличение процента выхода годных изделий КМОП СБИС при формировании  
 многоуровневых медных межсоединений за счет:

- 35 - упрощения технологического маршрута создания жесткой маски;
- устранения искажений и дефектности при вскрытии траншей и переходных окон через жесткую маску;
- устранения деградация low-k диэлектрика вследствие избежания контакта плазмы для удаления фоторезиста с пористой поверхностью low-k диэлектрика.

40 Указанные цели достигаются, если в маршруте производства КМОП СБИС при формировании многоуровневых медных межсоединений в качестве жесткой маски вместо слоя металлического нитрида титана (TiN) используется слой металлического вольфрама (W).

Отличительными признаками по отношению к прототипу, характеризующими  
 45 изобретение, которые являются также существенными признаками, является разработка способа для формирования многоуровневых медных межсоединений СБИС (Фиг.8) без изменения параметров конструкторской топологии (т.е. уменьшения линейных размеров). Вместо материала верхнего слоя жесткой маски TiN прототипа мы применяем

другой материал верхнего слоя жесткой маски W.

Техническим результатом предложенного решения является формирование заданного профиля травления, соответствующего требованиям по формированию контактов и траншей.

- 5 Указанный технический результат достигается за счет того, что при формировании многоуровневых медных межсоединений СБИС процессом двойного Дамасцена через двухслойную жесткую маску, включающим нанесение слоя изолирующего диэлектрика на пластину, в теле которого будут формироваться проводники многоуровневой металлизации интегральной схемы, нанесение поверх изолирующего диэлектрика
- 10 нижнего слоя двухслойной жесткой маски двуокиси кремния и верхнего слоя двухслойной жесткой маски, формирование на верхнем слое двухслойной жесткой маски топологической маски из резиста, травление верхнего слоя двухслойной жесткой маски по топологической маске из резиста, удаление остаточного резиста с поверхности топологического рисунка, сформированного в верхнем слое двухслойной жесткой
- 15 маски, травление нижнего слоя двухслойной жесткой маски двуокиси кремния по топологическому рисунку верхнего слоя двухслойной жесткой маски, вытравливание траншей и переходных контактных окон в слое изолирующего диэлектрика по топологическому рисунку в двухслойной жесткой маске, заполнение сформированных траншей и переходных контактных окон слоем металлизации и удаление избыточного
- 20 объема нанесенного металла с поверхности пластин, в качестве материала верхнего слоя жесткой маски используется слой вольфрама.

Толщина верхнего слоя вольфрама двухслойной жесткой маски составляет от 25 нм до 100 нм.

Графические изображения, поясняющие сущность изобретения

- 25 Фиг.1 - Поперечное сечение полупроводникового прибора, производимого в соответствии с изобретением States Patent 5635423.

Фиг.2 - Траншеи пористого SiOCH, протравленные через жесткую маску (a) SiO<sub>2</sub>, (b) TiN.

- 30 Фиг.3 - Схема стека пористого low-k диэлектрика с двухслойной жесткой маской SiO<sub>2</sub>/TiN.

Фиг.4 - РЭМ поперечное сечение структуры пористого диэлектрика, протравленного через TiN жесткую маску.

Фиг.5 - Природа осадков TiFx, эффект локального маскирования.

Фиг.6 - Природа осадков TiFx, эффект глобального маскирования.

- 35 Фиг.7 - Искривление линий пористого SiOCH, протравленного через жесткую маску TiN.

Фиг.8 - Схема формирования пористого low-k диэлектрика, используя двухслойную жесткую маску W/SiO<sub>2</sub> в соответствии с нашим предлагаемым изобретением.

- 40 Фиг.9 - Схема стека пористого low-k диэлектрика с двухслойной жесткой маской W/SiO<sub>2</sub>.

Фиг.10 - Профиль структуры W/SiO<sub>2</sub>. Исходная толщина W 55-нм. Параметры процесса: W<sub>ICP</sub>=600 Вт, W<sub>CM</sub>=80 Вт (-90 В), P=6 мТорр, t=60 сек.

Осуществление предлагаемого изобретения

- 45 Предлагаемое изобретение реализуется следующим образом (Фиг.8). Стек межсоединений включает в себя подложку 1, диэлектрический слой 2 (термический оксид, TEOS, легированный оксид и др.), металлический слой 3 (медь) и стоп-слой 4 (непроводящие материалы, пленки на основе SiC и SiCN), пористый low-k диэлектрик 5, маскирующий слой 6 (низкотемпературный оксид, TEOS,), который используется в

качестве нижнего слоя двухслойной жесткой маски, маскирующий слой 7 (вольфрам) который используется в качестве верхнего слоя двухслойной жесткой маски, и слой электронорезиста 8 (Фиг.8 А).

5 Сначала производится формирование переходного контактного окна путем формирования топологического рисунка в верхнем слое двухслойной жесткой маски 7 через электронорезистивную маску 8 методом плазмохимического травления. Затем остатки электронорезистивной маски 8 удаляются в плазме (Фиг.8 Б) в этом же реакторе.

После удаления электронорезистивной маски 8 проводится процесс плазмохимического формирования переходного контактного окна в слое пористого 10 low-k диэлектрика 5 до стоп-слоя 4 через нижний слой 6 двухслойной жесткой маски, сформированной по топологии верхнего слоя 7 двухслойной жесткой маски (Фиг.8 В).

Так как процесс формирования топологии в жесткой маске и процесс последующего травления low-k диэлектрика осуществляются во фторсодержащих плазмах, нет необходимости разделять эти процессы по разным реакторам.

15 После формирования переходного контактного окна в слое пористого low-k диэлектрика 5 остатки верхнего слоя вольфрама 7 двухслойной жесткой маски удаляют в плазме и проводят очистку поверхности пластины методами сухой и жидкостной очистки (Фиг.8 Г).

После формирования переходного контактного окна происходит формирование 20 траншеи межсоединения по традиционному маршруту двойного Дамасцена, для этого формируют новый стек путем осаждения планаризирующего жертвенного слоя 9 (ARC, SOG), который заполняет сформированные ранее переходные контактные окна. Далее, снова осаждается верхний слой двухслойной жесткой маски 10 из вольфрама, на который наносится электронорезист 11 (Фиг.8 Д).

25 Формирование траншеи межсоединений происходит путем формирования топологического рисунка в верхнем слое двухслойной жесткой маски 10 через электронорезистивную маску 11 методами плазмохимического травления (Фиг.8 Е).

После формирования верхнего слоя 10 двухслойной жесткой маски по топологии траншеи проводится процесс плазмохимического травления жертвенного слоя 9 по 30 топологии траншеи до нижнего слоя 6 двухслойной 4 жесткой маски (Фиг.8 Ж).

Затем проводится процесс плазмохимического формирования траншеи в пористом low-k диэлектрике 5 через нижний слой 6 двухслойной жесткой маски по топологии траншеи, сформированной в жертвенном слое 9 ранее (Фиг.8 З).

После формирования траншеи в пористом low-k диэлектрике 5 плазмохимическими 35 методами удаляют остатки верхнего слоя 10 двухслойной жесткой маски и жертвенный слой 9 (Фиг.8 И).

Далее по топологии переходного контактного окна происходит травление стоп-слоя 4 и вскрытие контакта к нижележащему металлическому слою. Затем проводится жидкостная очистка поверхности пластины (Фиг.8 К).

40 Далее происходит процесс конформного осаждения барьерного слоя и металлического слоя проводника 12 (Медь) (Фиг.8 Л).

Затем методом химико-механической полировки удаляют остатки металлического слоя проводника 12 вместе с нижним слоем 6 двухслойной жесткой маски (Фиг.8 М).

Так формируется один уровень разводки. Следующий уровень разводки формируется 45 аналогичным способом, описанным выше, при этом в качестве подложки (позиция 1 Фиг.8) выступает сформированный ранее уровень разводки. Таким образом формируются многоуровневые металлические соединения.

Плазмохимическое травление приведенной многослойной структуры проводилось

с использованием технологического реактора высокоплотной плазмы методом реактивно-ионного травления. В состав установки входят: вакуумная система (система откачки), включающая в себя турбомолекулярный насос, безмасляный механический насос, форвакуумную и байпасную магистрали, вакуумные клапаны и арматуру, вакуумные датчики для контроля остаточного и рабочего вакуума. Плазмохимический реактор, включает в себя:

- источник плазмы с индуктивным возбуждением плазмы и магнитной системой для повышения плотности плазмы и радиальной однородности ее параметров;

- распределитель газа, обеспечивающий однородное распределение газовых потоков и возможность их регулирования в зоне осаждения;

- нагреваемый столик-держатель пластин с подачей газообразного гелия под пластину для выравнивания распределения температуры по пластине и улучшения теплового контакта последней с держателем.

- систему регулирования газонапуска (5 каналов, каждый из которых включает в себя быстро реагирующий регулятор массового расхода газа и 2 запирающих клапана);

- ВЧ-генератор с устройством согласования с индуктором возбуждения плазмы;

- ВЧ-генератор с устройством согласования для подачи смещения на держатель пластины;

- систему контроля и поддержания температуры пластины;

- шлюзовую камеру для индивидуальной загрузки пластин.

Скорость травления определялась потерей толщины материала в процессе травления. Профили сформированных структур были обследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM).

В процессе плазмохимического анизотропного травления вольфрамового слоя в качестве рабочих газов использовались смеси элегаза ( $\text{SF}_6$ ) с кислородом. Все процессы проводились в диапазоне поддержания температуры пластины  $4-25^\circ\text{C}$ . В качестве рабочих образцов использовались кремниевые пластины КДБ-10 с ориентацией (100), на которые были нанесены слои  $\text{SiO}_2$  (стоп-слой толщиной 50-400 нм) и слой вольфрама толщиной 25-100 нм (Фиг.9). В качестве маски использовался электронорезист ПММА-950К-А2, а также резист ТОК САР 112А3.

Проведем предварительные оценки оптимальной толщины маскирующих слоев из вольфрама для формирования второго слоя из  $\text{SiO}_2$  двойной маски для травления пористых low-k диэлектриков. Для щелей шириной 50 нм аспектное отношение без учета высоты первого слоя маски становится  $400 \text{ нм}/50 \text{ нм}=8$ , что сильно замедлит процесс травления в узких щелях. Оптимальными по толщине являются слои вольфрама, примерно в 10 раз более тонкие, чем толщина слоя low-k диэлектрика. Малая толщина вольфрамового покрытия позволяет использовать электронорезисты малой толщины, что в свою очередь приводит к увеличению разрешения на операции электронолитографии. Поэтому толщина слоя для масок на основе W выбирается в диапазоне от 25 нм до 100 нм.

В свою очередь для травления слоя пористого low-k диэлектрика толщиной 400 нм через маски толщины необходимы технологические процессы, обеспечивающие высокую селективность по отношению к жесткой маске из W (с учетом фасетирования маски) не менее 15.

Для достижения подобных значений селективности мы использовали обычно применяемые для травления окиси кремния смеси, где в качестве основного газа поставщика фторуглерод-радикалов применяются сильные полимеробразующие газы, такие как  $\text{C}_4\text{F}_8$ . Правильный подбор состава газовой смеси, приложенного к образцу,

ВЧ-смещения и рабочей температуры образца позволяют поддерживать на поверхности вольфрама необходимую для обеспечения селективности толщину фторполимерного слоя (около 3 нм), что приводит к большому различию в скоростях травления диэлектрика и маски. Процесс травления диэлектрика проводился в том же технологическом реакторе, что и травление первого слоя жесткой маски.

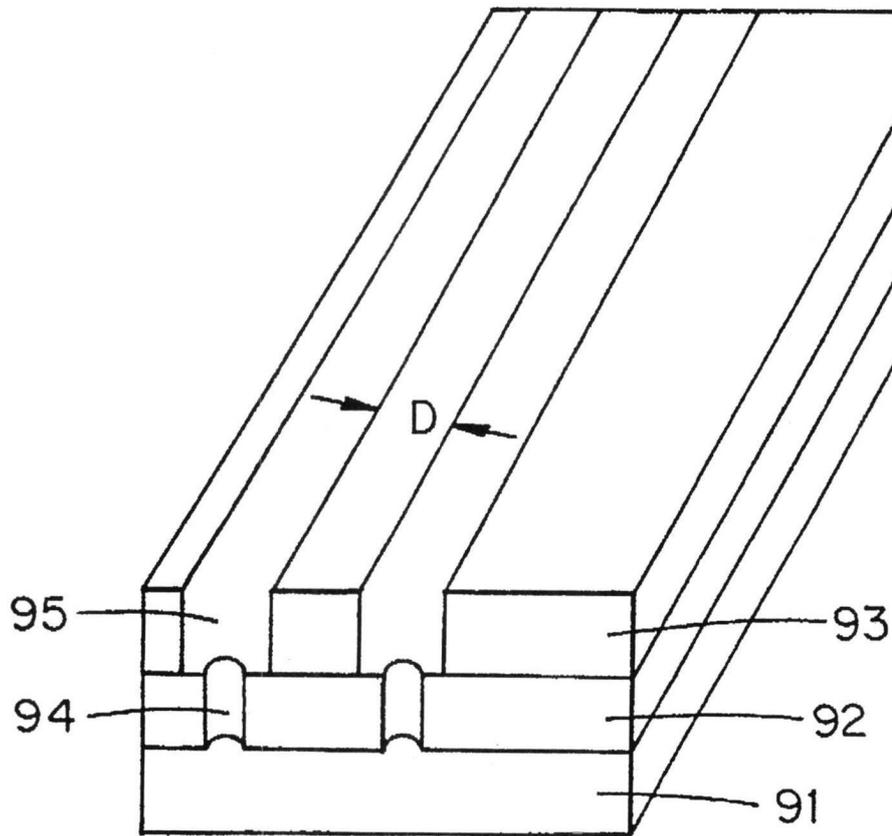
На Фиг.10 изображен профиль травления второго слоя диоксида кремния на глубину травления 240 нм через маску первого слоя W с начальной толщиной 32 нм двойной жесткой маски для формирования пористых low-k диэлектриков при минимальном размере 50 нм. Процесс демонстрирует низкую дефектность и отсутствие загрязнений на дне протравленных траншей. В данном процессе достигнута селективность травления по отношению к вольфрамовой маске не менее 15, при этом вертикальный профиль в нижней части маски говорит о сохранении возможности маскирования при продолжении процесса травления.

Таким образом, использование технологии, так называемой двойной жесткой маски, позволяет формирование пористых low-k диэлектриков для технологии 45 нм и ниже. В качестве материалов для двойной жесткой маски выбраны вольфрам в качестве первого, верхнего, слоя толщиной от 25 нм до 100 нм и оксид кремния в качестве второго, нижнего, слоя, покрывающего пористый low-k диэлектрик, толщиной от 30 до 300 нм.

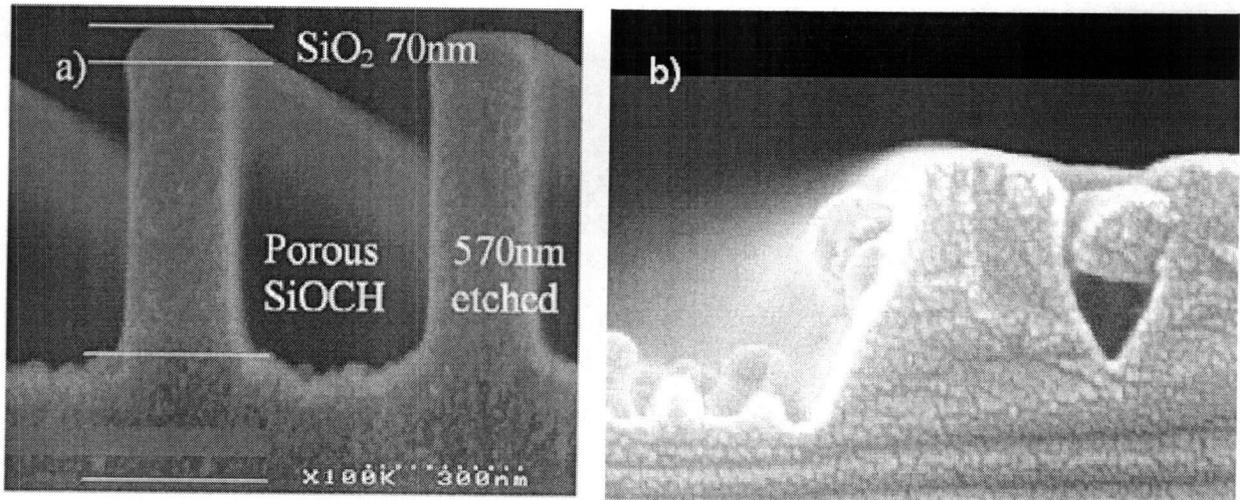
#### Формула изобретения

1. Способ формирования многоуровневых медных межсоединений СБИС по процессу двойного Дамасцена через двухслойную жесткую маску, включающий нанесение слоя изолирующего диэлектрика на пластину, в теле которого будут формироваться проводники многоуровневой металлизации интегральной схемы, нанесение поверх изолирующего диэлектрика нижнего слоя двухслойной жесткой маски двуокиси кремния и верхнего слоя двухслойной жесткой маски, формирование на верхнем слое двухслойной жесткой маски топологической маски из резиста, травление верхнего слоя двухслойной жесткой маски по топологической маске из резиста, удаление остаточного резиста с поверхности топологического рисунка, сформированного в верхнем слое двухслойной жесткой маски, травление нижнего слоя двухслойной жесткой маски двуокиси кремния по топологическому рисунку верхнего слоя двухслойной жесткой маски, вытравливание траншей и переходных контактных окон в слое изолирующего диэлектрика по топологическому рисунку в двухслойной жесткой маске, заполнение сформированных траншей и переходных контактных окон слоем металлизации и удаление избыточного объема нанесенного металла с поверхности пластин, отличающийся тем, что в качестве материала верхнего слоя жесткой маски используется слой вольфрама.

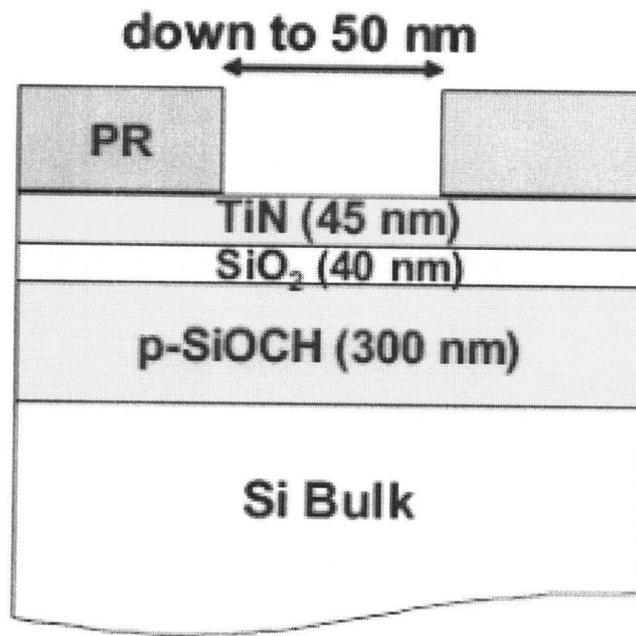
2. Способ по п.1, отличающийся тем, что толщина верхнего слоя вольфрама двухслойной жесткой маски составляет от 25 нм до 100 нм.



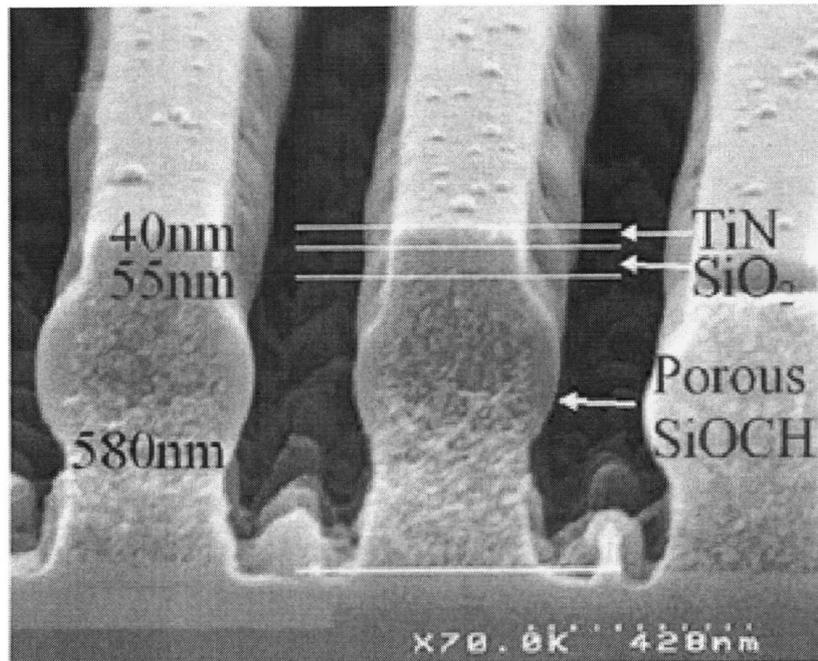
Фиг. 1



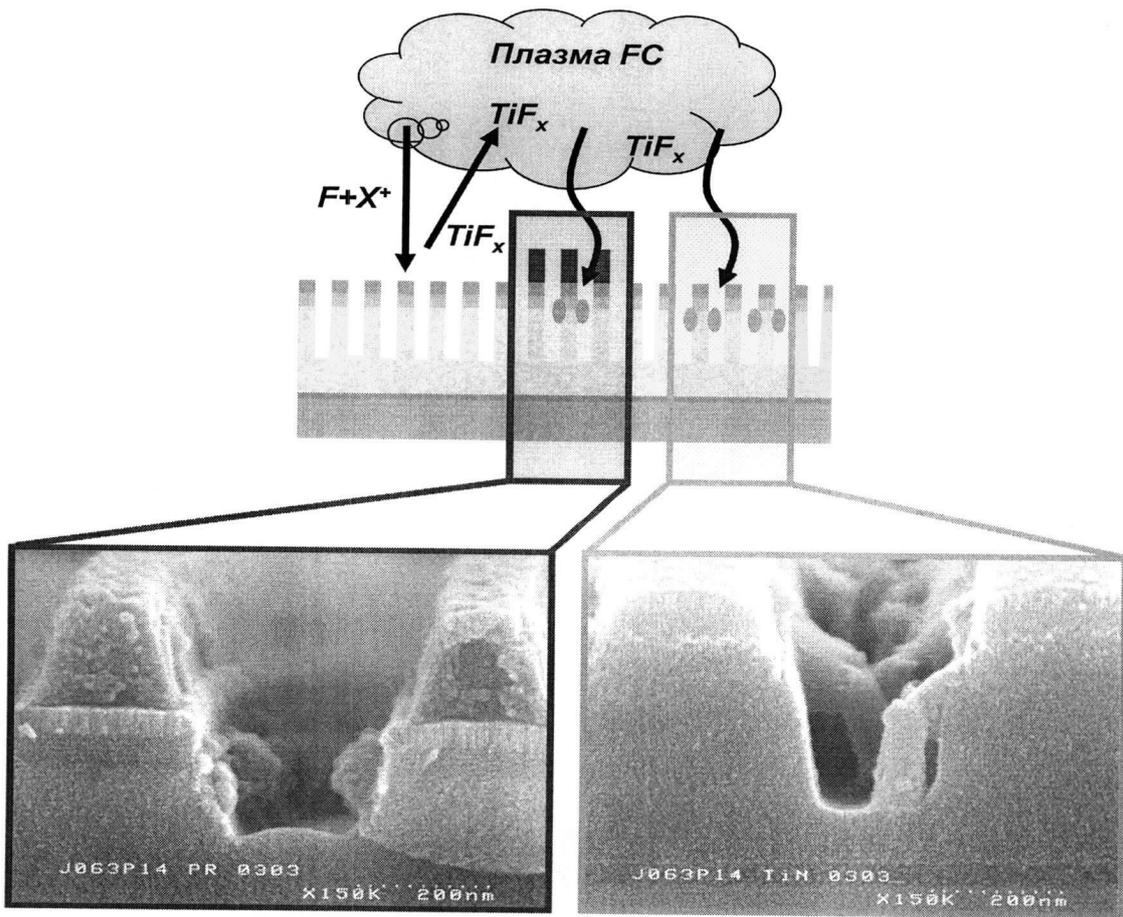
Фиг. 2



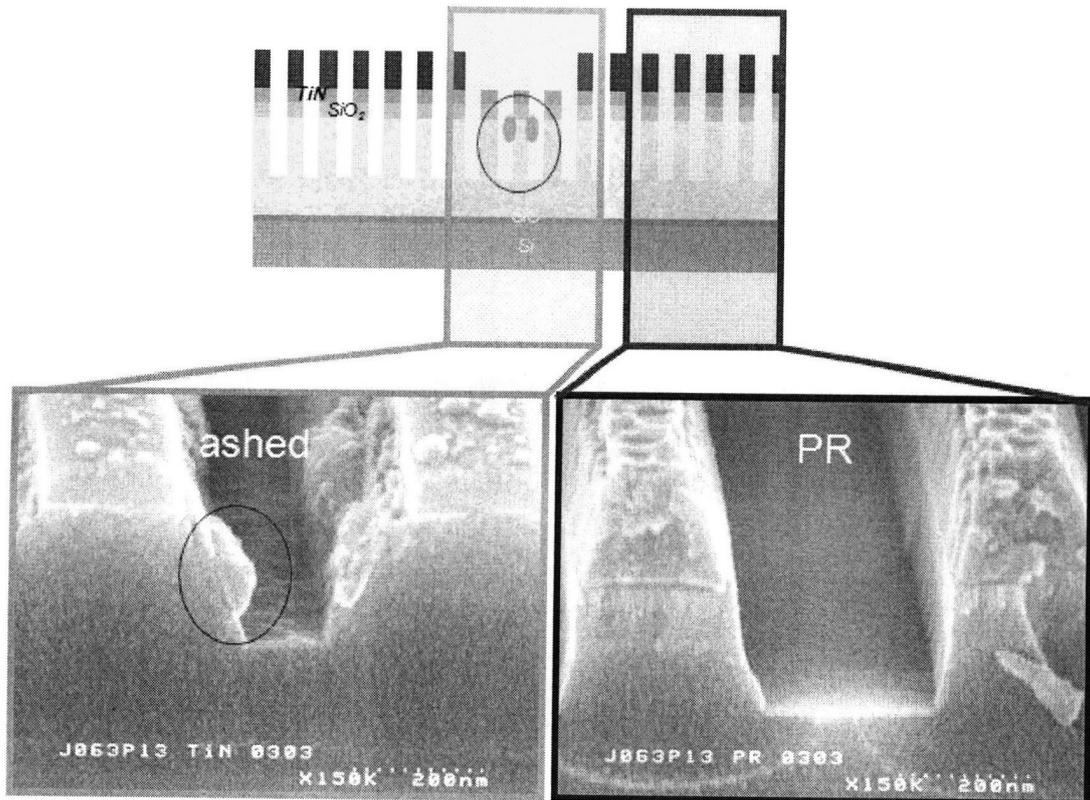
Фиг. 3



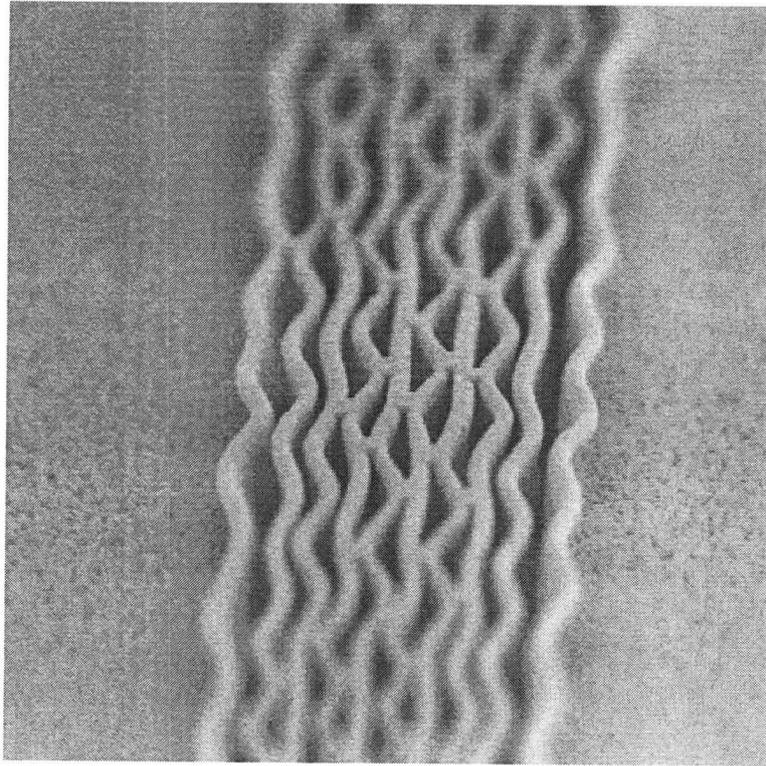
Фиг. 4



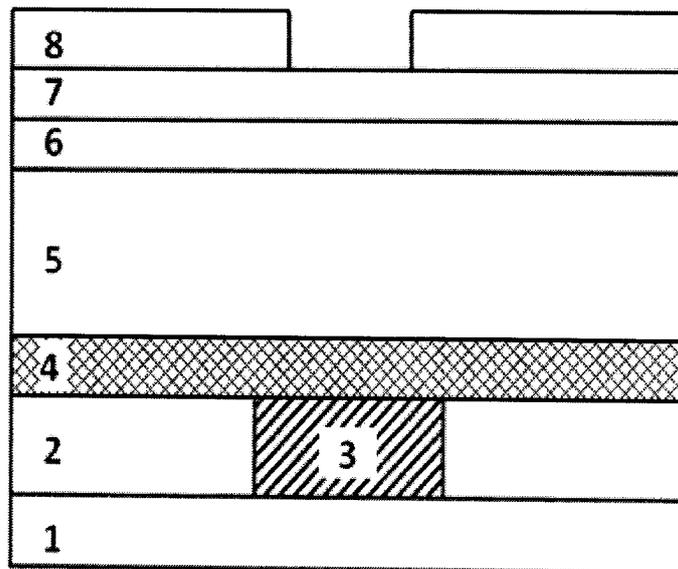
Фиг. 5



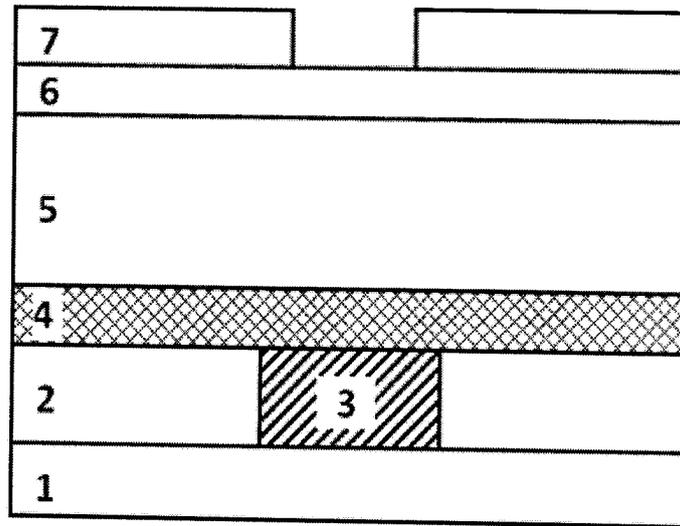
Фиг. 6



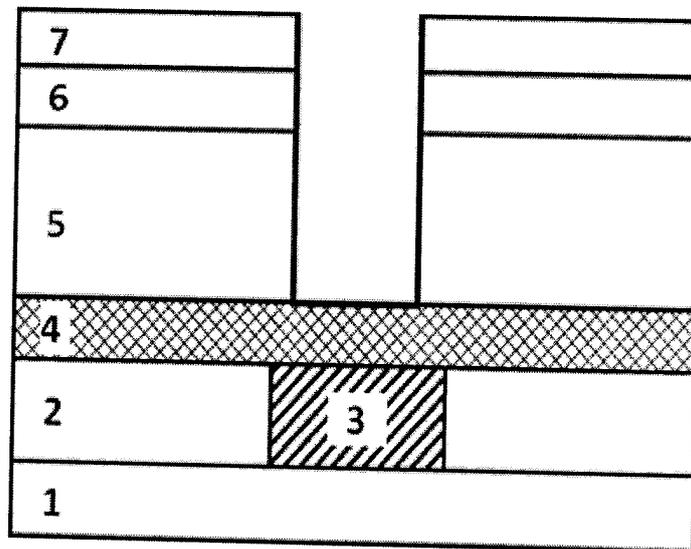
Фиг. 7



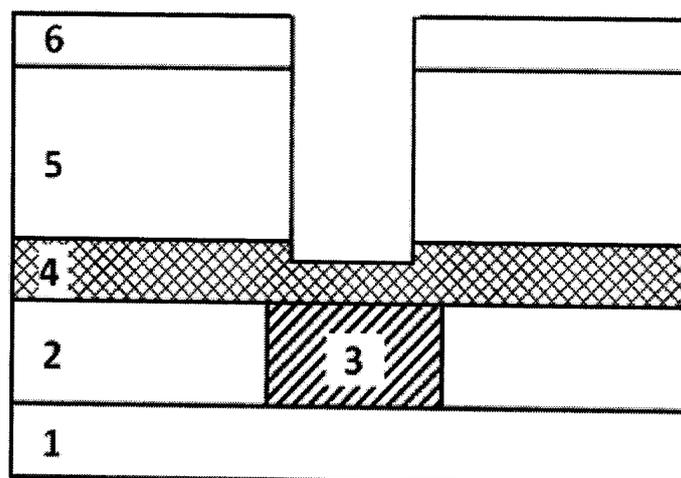
Фиг. 8 А



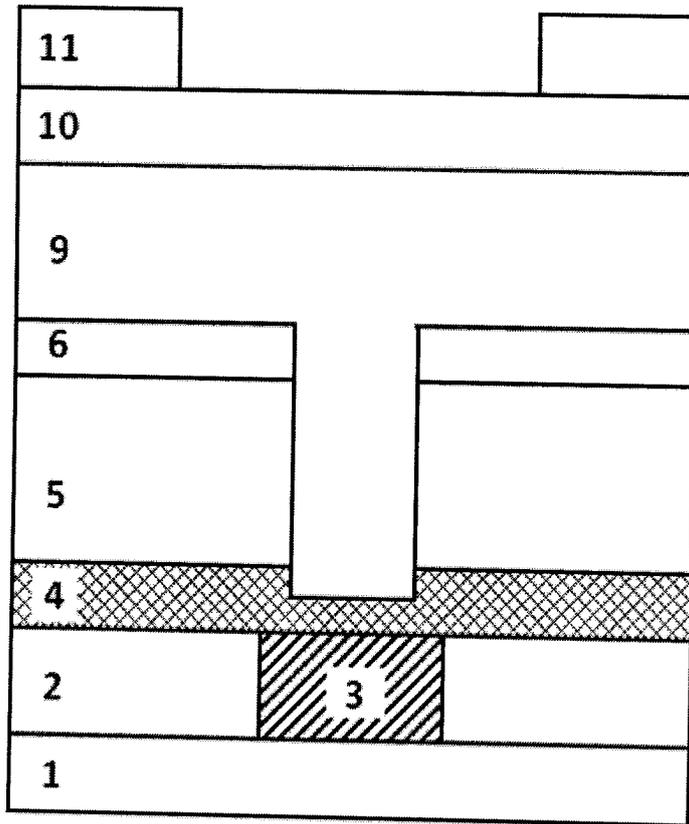
Фиг. 8 Б



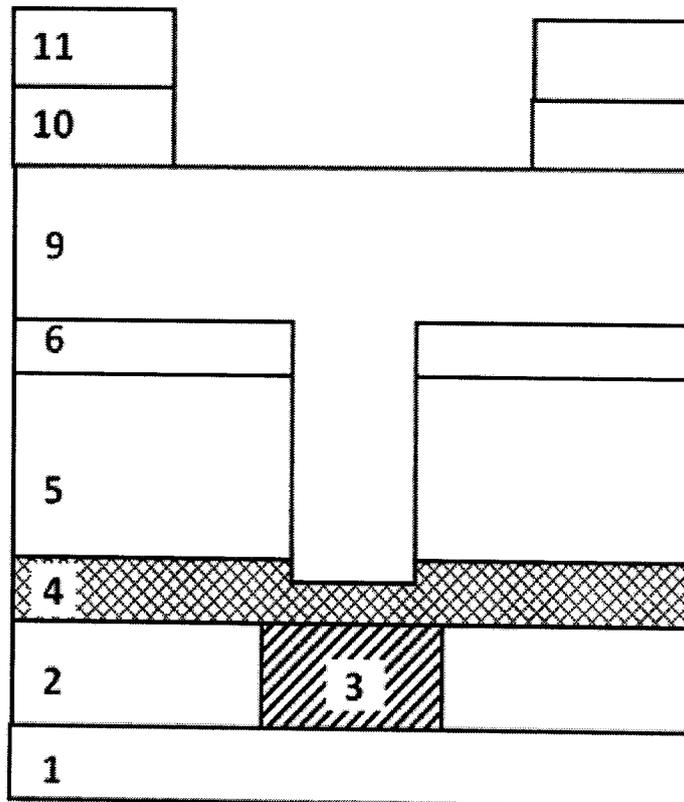
Фиг. 8 В



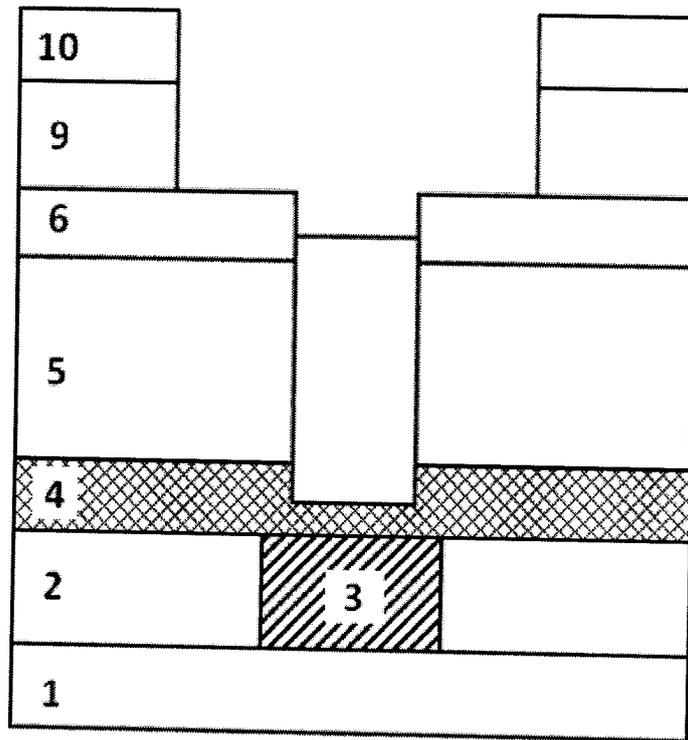
Фиг. 8 Г



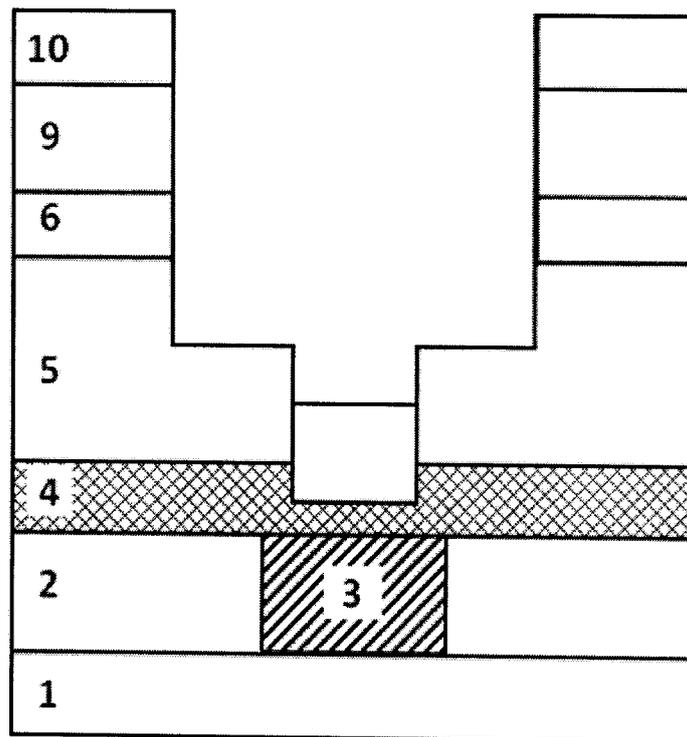
Фиг. 8 Д



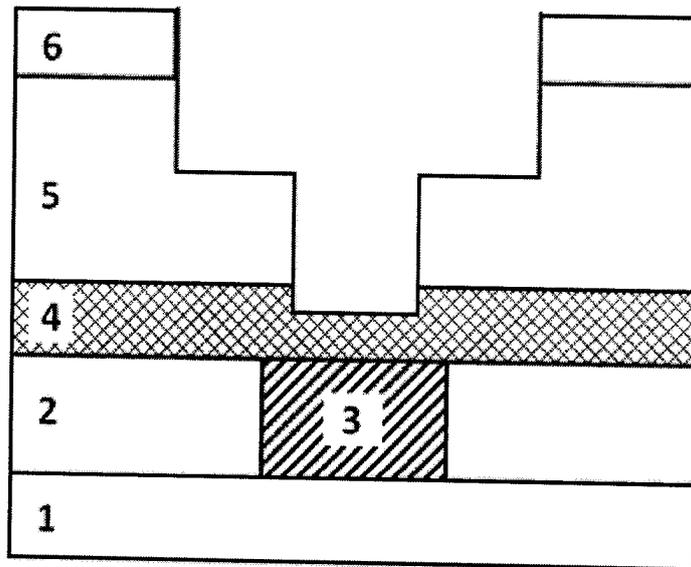
Фиг. 8 Е



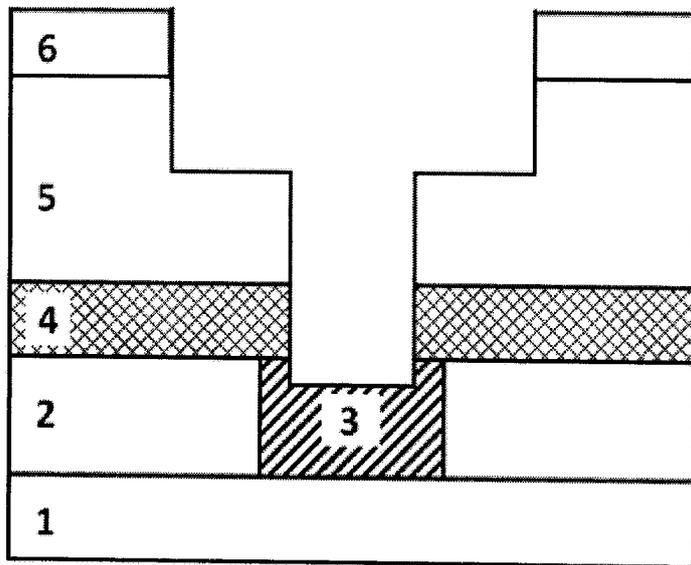
Фиг. 8 Ж



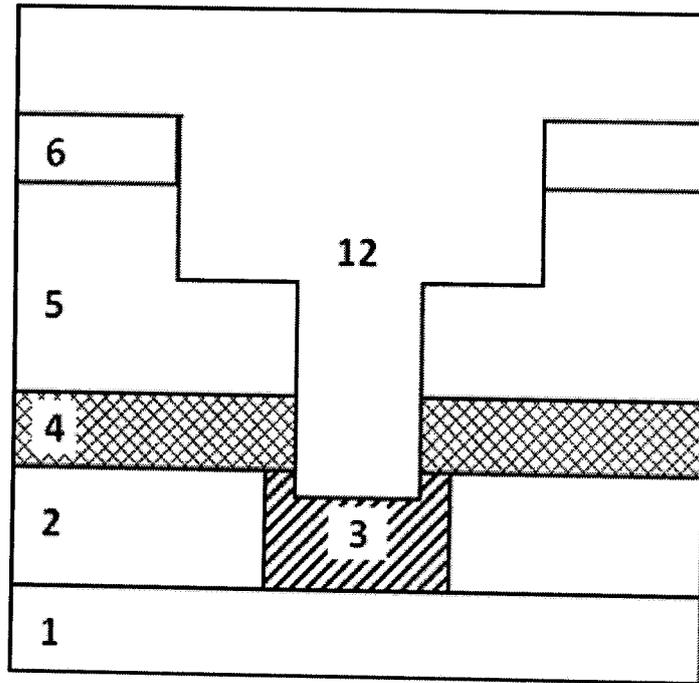
Фиг. 8 З



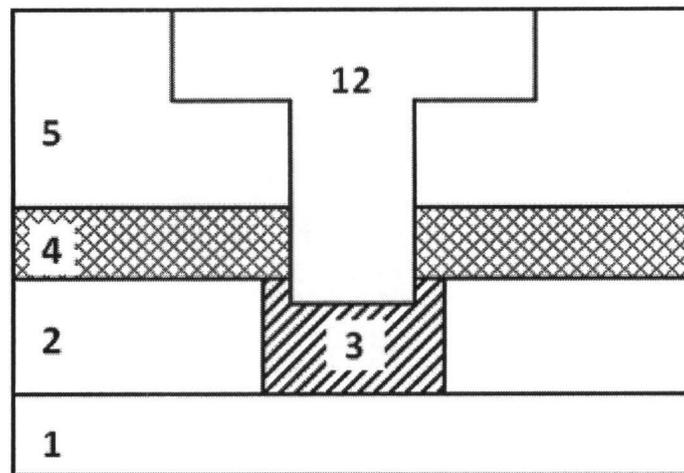
Фиг. 8 И



Фиг. 8 К



Фиг. 8 Л

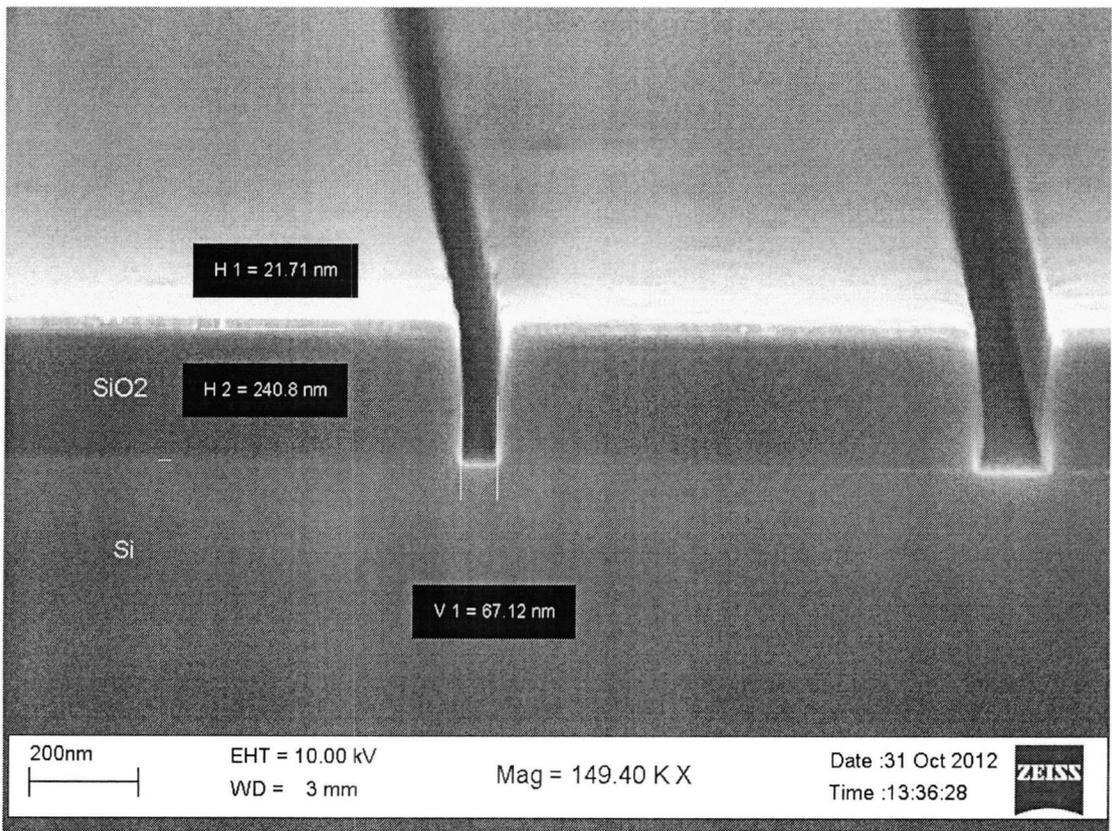
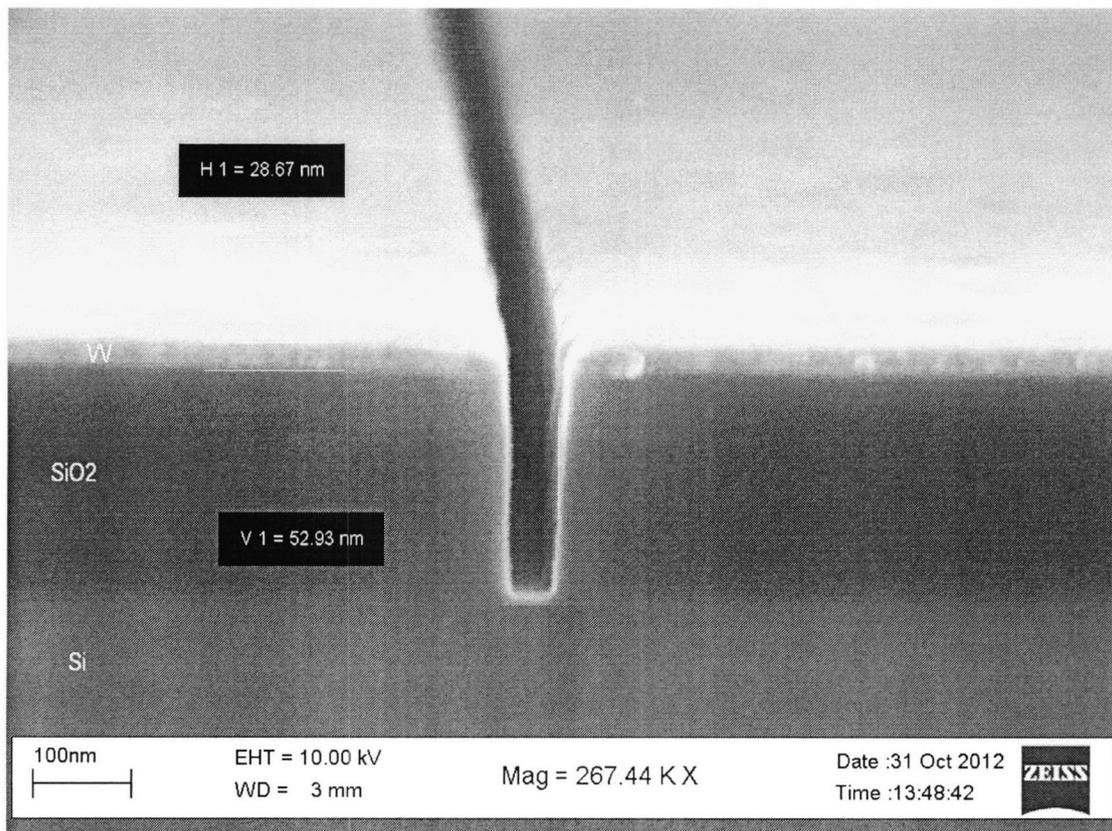


Фиг. 8 М

**Фиг. 8**



Фиг. 9



Фиг. 10