

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01L 29/78 (2019.02); B82Y 10/00 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2018119009, 23.05.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.05.2018Дата регистрации:
09.07.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.05.2018

(45) Опубликовано: 09.07.2019 Бюл. № 19

Адрес для переписки:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1,
Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Фонд "Национальное
интеллектуальное развитие"

(72) Автор(ы):

Божьев Иван Вячеславович (RU),
Преснов Денис Евгеньевич (RU),
Крупенин Владимир Александрович (RU),
Снигирев Олег Васильевич (RU),
Шорохов Владислав Владимирович (RU),
Дагесян Саркис Арменакович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова" (МГУ)
(RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: Martin Fuechsle et al., A single-atom
transistor. Nature Nanotechnology, v.7, 2012,
p.242-246. JP 2014003196 A, 09.01.2014.
V.V.Shorokhov et al., Single-electron tunneling
through an individual arsenic dopant in silicon.
Nanoscale, v.2, 2017. С.А.Дагесян и др.,
Одноэлектронный транзистор с островом
из нескольких примесных атомов фосфора.
ВМУ. (см. прод.)(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ ОДНОАТОМНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С
ОТКРЫТЫМ КАНАЛОМ ТРАНЗИСТОРА И ТРАНЗИСТОР, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ ТАКИМ
СПОСОБОМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к нанотехнологиям, а именно к технологиям изготовления одноэлектронных транзисторов с островом в виде единичных атомов в кристаллической решетке. Технический результат, достигаемый при использовании заявляемого изобретения, заключается в обеспечении высокой (~5 нм) точности позиционирования слоя с управляющими электродами относительно слоя с туннельными электродами. Поставленная задача решается тем, что способ изготовления одноэлектронного одноатомного транзистора с

открытым каналом, согласно техническому решению, включает последовательное: нанесение слоя позитивного электронного резиста (ЭРП) на пластину кремния на изоляторе (КНИ); формирование рисунка туннельных электродов проявления экспонированного рисунка в проявителе; напыление пленки стойкого к щелочному травлению металла на пластину с рисунком туннельных электродов с последующим удалением оставшегося резиста и пленки металла на нем в растворителе, нанесение пленки ЭРП на полученную пластину с туннельными

электродами и формирование рисунка маски; напыление пленки маскирующего материала, растворимого в щелочном растворе; удаление верхнего слоя кремния пластины КНИ; нанесение слоя резиста на полученную пластину с туннельными электродами с последующим формированием щели в полученном слое резиста; напыление слоя стойкого металла в сформированную щель с образованием

управляющих электродов; растворение маскирующего материала с остатками стойкого металла на нем в щелочном травителе. Технический результат достигается за счет использованием одного и того же жертвенного слоя (слой алюминия) как на этапе травления кристаллического канала, так и при напылении управляющих электродов. 2 н. и 10 з.п. ф-лы, 15 ил.

(56) (продолжение):

Серия 3. Физика. Астрономия, 5, 2017, стр.32-38.

RU 2 6 9 4 1 5 5 C 1

RU 2 6 9 4 1 5 5 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

H01L 29/78 (2019.02); B82Y 10/00 (2019.02)

(21)(22) Application: 2018119009, 23.05.2018

(24) Effective date for property rights:
23.05.2018Registration date:
09.07.2019

Priority:

(22) Date of filing: 23.05.2018

(45) Date of publication: 09.07.2019 Bull. № 19

Mail address:

119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1,
Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni
M.V. Lomonosova, Fond "Natsionalnoe
intelektualnoe razvitie"

(72) Inventor(s):

Bozhev Ivan Vyacheslavovich (RU),
Presnov Denis Evgenevich (RU),
Krupenin Vladimir Aleksandrovich (RU),
Snigirev Oleg Vasilevich (RU),
Shorokhov Vladislav Vladimirovich (RU),
Dagesyan Sarkis Armenakovich (RU)

(73) Proprietor(s):

Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj
universitet imeni M.V. Lomonosova" (MGU)
(RU)

(54) METHOD OF MANUFACTURING SINGLE-ELECTRON MONATOMIC TRANSISTORS WITH A TRANSISTOR OPEN CHANNEL AND A TRANSISTOR MANUFACTURED IN THIS WAY

(57) Abstract:

FIELD: nanotechnologies.

SUBSTANCE: invention relates to nanotechnology, particularly, to manufacturing of single-electron transistors with island in form of single atoms in crystal lattice. Claimed task is solved by the fact that the method of making a single-electron monatomic transistor with an open channel, according to the technical solution, involves successive: deposition of a layer of positive electronic resistor (ERP) on a silicon plate on an insulator (SOI); formation of a pattern of tunnel electrodes of developing an exposed pattern in a developer; sputtering of film resistant to alkali etching of metal on plate with pattern of tunnel electrodes with subsequent removal of remaining resist and metal film on it in solvent, applying ERP film to obtained plate with tunnel electrodes and forming mask pattern; sputtering of masking material film soluble in alkaline

solution; removing silicon top surface of SOI plate; applying a resist layer on the obtained plate with tunnel electrodes, followed by forming a slit in the obtained resist layer; deposition of a layer of resistant metal in the formed slot with formation of control electrodes; dissolving of masking material with residues of proof metal on it in alkaline etching agent. Technical result is achieved by using the same sacrificial layer (aluminium layer) both at the stage of crystalline channel etching and during sputtering of control electrodes.

EFFECT: technical result achieved when using the claimed invention is to ensure high (~5 nm) of positioning accuracy of layer with control electrodes relative to layer with tunnel electrodes.

12 cl, 15 dwg

Область техники

Заявляемое изобретение относится к нанотехнологиям, а именно к технологиям изготовления одноэлектронных транзисторов с островом в виде единичных атомов в кристаллической решетке.

5 Уровень техники

Известны отдельные способы изготовления одноэлектронных одноатомных транзисторов с островом в виде единичного примесного атома в кристаллической решетке, например, атома бора в кристаллической решетке кремния.

В одном из известных способов дотированный бором кремниевый канал покрывают
10 тонким слоем диэлектрика, и на нем формируется управляющий электрод Sellier H. et al. *Transportspectroscopy of a single dopant in a gated siliconnanowire* (Селлиер Х. и др. «Спектроскопия транспорта через единичный допант в закрытом кремниевом нанопроводе»). Достоинством данного способа является обеспечение минимального (1.4 нм) расстояния от управляющего электрода до кристаллического канала и,
15 соответственно, острова транзистора. В то же время, основным недостатком известного способа является закрытость кристаллического канала, что не позволяет производить с ним технологические операции после изготовления транзистора.

Из уровня техники известно также решение одноэлектронного транзистора с закрытым каналом и способ его изготовления, опубликованные в патенте JP 2017028153.

20 Достоинства и недостатки известного способа аналогичны другим схемам одноэлектронных одноатомных транзисторов с закрытым каналом: близкое расположение управляющего электрода позволяет управлять электронным транспортом в таком транзисторе с помощью меньших напряжений, однако закрытость канала исключает возможность добавления/удаления примесных атомов в кристаллический
25 канал.

Изготовление одноэлектронных транзисторов с островом из нескольких примесных атомов фосфора раскрыто в статье (ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2017. №5, Одноэлектронный транзистор с островом из нескольких примесных атомов фосфора, С.А. Дагесян, В.В. Шорохов, Д.Е. Преснов, Е.С. Солдатов, А.С. Трифонов,
30 В.А. Крупенин, О.В. Снигирев).

Недостатком этого метода является удаленное расположение (~80 нм) управляющих электродов от острова транзистора и разброс в их расположении при изготовлении, связанный с ограничением по точности совмещения нескольких литографических слоев (~30 нм).

35 Наиболее близким к заявляемому техническому решению является способ изготовления транзистора на основе атома фосфора в кристаллической решетке кремния (Dagesyan S.A. et al. *Sequential reduction of the silicon single-electron transistor structure to atomic scale*, *Nanotechnology* 28 (2017), (Дагесян С.А. и др., «Последовательное уменьшение кремниевого одноэлектронного транзистора до атомарного масштаба»), <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6528/aa6dea>). В известном способе управляющие и туннельные электроды
40 изготавливаются в одном литографическом цикле. Достоинством этого метода является возможность модификации уже готового устройства. Кристаллический канал между туннельными электродами может быть дополнительно имплантирован примесными атомами путем ионной имплантации или же наоборот, может уменьшаться для удаления
45 лишних примесных атомов путем реактивно-ионного травления, если изначально для изготовления использовался легированный кристалл.

Недостатком этого метода является удаленное расположение (~100 нм) управляющих электродов от острова транзистора, что приводит к уменьшению влияния управляющих

электродов на остров транзистора и, соответственно, для достижения требуемого уровня влияния требует подачи гораздо больших управляющих напряжений.

Техническая задача, решаемая посредством заявляемого изобретения, заключается в преодолении недостатков, присущих аналогам и прототипу, а именно в создании
5 одноэлектронного одноатомного транзистора с близко расположенными управляющими электродами и открытым кристаллическим каналом.

Технический результат, достигаемый при использовании заявляемого изобретения, заключается в обеспечении высокой (~5 нм) точности позиционирования слоя с управляющими электродами относительно слоя с туннельными электродами. При этом
10 заявляемый способ позволяет исключить зависимость точности позиционирования слоев управляющих и туннельных электродов от точности их совмещения, обеспечивая при этом возможность изготовления управляющих электродов на расстояниях 5-50 нм от острова транзистора без использования точного совмещения литографических слоев транзистора за счет использования одной и той же маски для травления
15 кристаллического канала, и формирования управляющих электродов. Упрощение способа изготовления транзисторов напрямую влияет на возможность увеличения выхода годных изготавливаемых образцов, повышая производительность. При этом выход годных транзисторов при изготовлении заявляемым способом составляет не менее 85%.

Поставленная задача решается тем, что способ изготовления одноэлектронного одноатомного транзистора с открытым каналом, согласно техническому решению, включает последовательное выполнение следующих этапов:

1) нанесение слоя позитивного электронного резиста (ЭРП) на пластину кремния на изоляторе (КНИ) в виде тонкой полимерной пленки;

25 2) формирование рисунка туннельных электродов в виде сужающихся по направлению друг к другу полос с зазором между их торцами в слое резиста посредством электронной литографии и проявления экспонированного рисунка в проявителе;

3) напыление пленки стойкого к щелочному травлению металла толщиной не более 50 нм на пластину с рисунком туннельных электродов с последующим удалением
30 оставшегося резиста и пленки металла на нем в растворителе, в результате чего получают пластину с металлическими выступами, представляющими собой туннельные электроды, расположенные с зазором между их торцами,

4) нанесение пленки ЭРП на полученную пластину с туннельными электродами и формирование рисунка маски с обеспечением покрытия маской туннельных электродов
35 и зазора между ними в слое резиста посредством электронной литографии и проявления экспонированного рисунка;

5) напыление пленки маскирующего материала, растворимого в щелочном растворе, толщиной не менее 5 нм на пластину с рисунком туннельных электродов с последующим удалением оставшегося резиста и пленки на нем посредством помещения пластины в
40 растворитель, в результате чего получают маску, покрывающую туннельные электроды и зазор между ними;

6) удаление верхнего слоя кремния пластины КНИ посредством анизотропного реактивно-ионного травления, при этом слой кремния остается только в местах, которые были защищены материалом маски и металлом туннельных электродов, включая
45 туннельные электроды и зазор между ними, а слой алюминиевой маски выступает за границы оставшегося слоя кремния на расстояние не более 10 нм;

7) нанесение слоя резиста на полученную пластину с туннельными электродами в виде пленки ЭРП с последующим формированием щели в полученном слое резиста с

использованием метода электронной литографии и проявления, в виде полосы, ориентированной под углом к линии расположения туннельных электродов;

8) напыление слоя стойкого металла в сформированную щель с образованием управляющих электродов и удаление растворителем остатков резиста с пленкой стойкого металла на нем;

9) растворение маскирующего материала с остатками стойкого металла на нем в щелочном травителе.

Напыление пленки ЭРП или маскирующего материала производят методом электронно-лучевого или термического испарения. Слой наносимого резиста на каждом этапе составляет не более 300 нм. В качестве ЭРП может быть использован полиметилметакрилат (ПММА), ZEP 520A или AR-P 6200. В качестве проявителя для проявления экспонированного рисунка при использовании в качестве ЭРП ПММА может быть использован водно-спиртовой раствор изопропанола, в соотношении 3:97 или МІВК:ІРА (метилизобутилкетон, изопропанол) в соотношении 1:3. При использовании в качестве ЭРП ZEP 520A или AR-P 6200 в качестве проявителя может быть использован амилацетат или ксилол и др. Для обеспечения проявления пластину выдерживают в проявителе не менее 30 с при комнатной температуре. В качестве стойкого металла может быть использован хром или титан. Толщина слоя маскирующего материала составляет не менее 5 нм. В качестве растворителя может быть использован ацетон или н-метилпирролидон. В качестве щелочного травителя может быть использован слабый (не более 5 мас. %) водный раствор КОН (гидроксид калия), время травления зависит от концентрации и температуры и подбирается таким образом, чтобы в процессе травления не был поврежден кристаллический канал.

Поставленная задача решается также тем, что одноэлектронный одноатомный транзистор с открытым каналом получен заявляемым по п. 1 формулы изобретения способом, при этом управляющие электроды транзистора расположены на расстоянии не более чем на 5-50 нм от острова транзистора.

Краткое описание чертежей

Изобретение поясняется следующими чертежами.

На фиг. 1-10 схематично представлена последовательность видоизменений исходного материала, обеспечивающая получение заявляемого транзистора, при этом

на фиг. 1 - схематично изображена пластина кремния на изоляторе;

на фиг. 2 - схематично изображен экспонированный рисунок туннельных электродов;

на фиг. 3 - схематично изображен результат проявления экспонированного рисунка

туннельных электродов;

на фиг. 4 - схематично изображено первое напыление пленки стойкого металла;

на фиг. 5 - схематично изображена пластина с сформированными туннельными электродами после удаления слоя резиста;

на фиг. 6 схематично изображено покрытие алюминиевой маской пластины с

туннельными электродами;

на фиг. 7 схематично изображен результат реактивно-ионного травления;

на фиг. 8 схематично изображено нанесение слоя резиста на полученную пластину с туннельными электродами и формирование щели;

на фиг. 9 схематично представлена структура после напыления слоя стойкого металла в сформированную щель с образованием управляющих электродов и удаления резиста;

на фиг. 10 схематично показано растворение алюминиевой маски с остатками хрома.

На фиг. 11 укрупненно представлено изображение фиг. 10.

На фиг. 12-15 представлены фотоизображения, характеризующие отдельные этапы

изготовления транзистора. Микрофотографии получены в растровом электронном микроскопе Zeiss Supra-40, при этом

на фиг. 12 представлено изображение нанесенной алюминиевой маски;

на фиг. 13 представлено изображение результата реактивно-ионного травления через нанесенную маску;

на фиг. 14 представлена микрофотография образца после напыления слоя управляющих электродов и удаления резиста;

на фиг. 15 представлена микрофотография финальной структуры одноэлектронного одноатомного транзистора после удаления алюминиевой маски.

Позициями на чертежах обозначены:

1. пластина КНИ

2. слой резиста полиметилметакрилата

3. туннельные электроды

4. слой стойкого металла

5. алюминиевая маска

6. управляющие электроды

7. зазор между островом транзистора и управляющими электродами.

Реализация заявляемого способа описана ниже на примере конкретного выполнения, с последовательным выполнением следующих этапов и использованием конкретных соединений в качестве проявителя и растворителя. Использование иных, заявленных в формуле изобретения соединений в качестве проявителя, растворителя, а также других вариантов используемого резиста не противоречит описываемой технологии.

Этап 1.

На пластину кремния на изоляторе (КНИ) (фиг. 1) методом центрифугирования (скорость вращения 3000 об/мин, 30 секунд) наносили тонкий (не более 300 нм) слой резиста полиметилметакрилата (ПММА). Для электронной литографии в настоящее время широко применяются резисты на основе полиметилметакрилата (ПММА). В тех случаях, когда этот материал не удовлетворяет каким-либо специфическим требованиям к процессам, используются другие решения. Основными компонентами для создания альтернативных резистов являются α -хлорметакрилат с α -метилстиролом (например, ZEP 520A и AR-P 6200), водородный силсесквиоксан (HSQ - XR 1541), каликсарены, фуллерены и некоторые другие.

Этап 2.

Методом электронной литографии (ускоряющее напряжение 20 кВ, доза экспонирования 250 мккл/см^2) в слое ПММА экспонировался рисунок туннельных электродов (фиг. 2) в виде узких (не более 50 нм) полос с узким зазором (не более 50 нм) между их торцами. Для проявления экспонированного рисунка пластину погружали в проявитель на 60 секунд, при этом минимально возможное время выдержки составляет 30 с. В качестве проявителя использовали водно-спиртовой раствор (вода : изопропанол в соотношении 3:97 по объему) (фиг. 3). В случае использования в качестве ЭРП ZEP 520A и AR-P 6200 следует в качестве проявителя применять амилацетат или ксилол.

Этап 3.

Методом электронно-лучевого испарения (подробно раскрытым, например, в следующем источнике информации: (Савали П.А. Методы получения тонких пленок путем вакуумного напыления: сравнительное исследование Physical Vapor Deposition (PVD) Methods for Synthesis of Thin Films: A Comparative Study P.A. Savale (<http://www.scholarsresearchlibrary.com/articles/physical-vapor-deposition-pvd-methods-for-synthesis-of-thin-films-a-comparative-study.pdf>, стр. 3) на пластину напыляли тонкую (не более 15

нм) пленку стойкого металла (фиг. 4). В качестве такого металла может быть использован хром или титан. В описываемой реализации был использован хром, однако использование титана дает аналогичный результат. Затем пластину с пленкой хрома погружали в растворитель, в качестве которого использовали ацетон, для растворения резиста и удаления хрома в областях, где он находился на резисте (фиг. 5).

Этап 4.

На полученную пластину с туннельными электродами аналогичным этапу 1 образом наносили слой (не более 300 нм) ПММА, и методом электронной литографии с совмещением (с использованием параметров и условий, указанных выше)

экспонировался рисунок маски, закрывающей зазор между туннельными электродами и частично перекрывающийся с частью электродов вблизи зазора. Подробная реализация метода электронной литографии раскрыта, например, в следующем источнике информации: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9285/92850C/Technology-of-alignment-mark-in-electron-beam-lithography/10.1117/12.2068112.short?SSO=1> (Мин Зао, Танг Хв и др. Технология совмещения по меткам в электронной литографии Technology of alignment mark in electron beam lithography Min Zhao: Tang Xu et al. Для проявления экспонированного рисунка пластину погружали в проявитель на 60 секунд, при этом минимально возможное время выдержки составляет 30 с. В качестве проявителя использовали водно-спиртовой раствор (вода : изопропанол в соотношении 3:97 по

объему).

Этап 5.

После проявления, методом электронно-лучевого испарения полученный образец покрывался слоем алюминия (толщиной не менее 5 нм) и производился процесс растворения резиста и удаления алюминия в областях, где он находился на резисте (формирование алюминиевой маски).

Вместо алюминия на этом этапе может использоваться другой материал, способный служить в качестве маски при реактивно-ионном травлении во фторсодержащей плазме и растворимый в щелочном травителе, например, оксид алюминия.

Этап 6.

Проводили реактивно-ионное травление через полученную маску верхнего слоя кремния пластины КНИ во фторсодержащей плазме (характеристики: используемый газ SF₆, давление 0,2 Па, мощность ВЧ-генератора 50 Вт, продолжительность процесса 50 секунд). Процесс травления при таких параметрах является анизотропным, однако горизонтальная скорость травления не нулевая, из-за чего маска после травления «нависает» над кремнием (выступает за границы слоя кремния) на 5-10 нм. (фиг. 7, 13).

Этап 7.

Следующим шагом на пластину аналогичным этапу 1 образом наносился слой (не менее 200 нм) ПММА и методом электронной литографии с совмещением аналогично этапу 4 экспонировался рисунок управляющих электродов в виде полосы, пересекающей область зазора между туннельными электродами под углом к линии расположения туннельных электродов.

Этап 8.

После проявления в резисте образуется щель шириной не менее 20 нм и глубиной, равной толщине слоя резиста (фиг. 8). Методом электронно-лучевого испарения образец покрывали слоем стойкого металла, в данном случае, хрома, толщиной, примерно равной толщине верхнего слоя кремния пластины КНИ (100 нм). Такая толщина необходима для того, чтобы функционально работало только горизонтальное расстояние от затвора до острова, при меньших толщинах будет добавляться

вертикальная составляющая расстояния. Остатки резиста с хромом на нем удалили в растворителе (фиг. 9).

Этап 9.

На данном этапе алюминиевую маску с остатками хрома на ней удаляли путем погружения образца в слабый щелочной раствор гидроксида калия (KOH, 2 мас. %) при комнатной температуре на 1 минуту (фиг. 10), с получением в результате заявляемого транзистора (фиг. 15).

Таким образом, с помощью заявляемого способа в соответствии с приведенными в описании параметрами был изготовлен транзистор со следующими характеристиками: расстояние между туннельными электродами - 20 нм, расстояние от центра кремниевого канала до управляющего электрода - 40 нм, расстояние от края кремниевого канала до затвора - 20 нм. Процентное содержание количества годных к дальнейшему использованию транзисторов, полученный заявляемым способом с использованием приведенных выше параметров и характеристик, составило 90% от общего числа изготовленных транзисторов.

В результате выполнения описанных этапов получили одноэлектронный одноатомный транзистор, характеризующийся тем, что его управляющие электроды расположены на расстояниях 5-50 нм от острова транзистора. Остров транзистора представляет собой примесный атом, который может располагаться как на краю, так и в центре кристаллического канала. Поэтому расстояние, на котором располагаются управляющие электроды от острова транзистора, определяется как расстояние от затвора до края кремниевого канала или от затвора до середины кремниевого канала. То есть, минимальное расстояние определяется «нависанием» алюминиевой маски над кремниевым каналом, а максимальное - суммой полуширины канала и минимального расстояния.

Технический результат достигается за счет использованием одного и того же жертвенного слоя (слой алюминия) как на этапе травления кристаллического канала, так и при напылении управляющих электродов. Такая методика позволяет изготавливать одноэлектронные одноатомные транзисторы с высоким выходом годных (не менее 85%). Точность позиционирования управляющих электродов относительно острова транзистора не зависит от точности совмещения литографического оборудования, а обеспечивается автоматически последовательностью действий и геометрией системы, что позволяет свести к минимуму различия между транзисторами, изготовленными описанным способом.

(57) Формула изобретения

1. Способ изготовления одноэлектронного одноатомного транзистора с открытым каналом, характеризующийся тем, что последовательно выполняют следующие этапы:

1) нанесение слоя позитивного электронного резиста (ЭРП) на пластину кремния на изоляторе (КНИ) в виде тонкой полимерной пленки;

2) формирование рисунка туннельных электродов в виде сужающихся по направлению друг к другу полос с зазором между их торцами в слое ЭРП посредством электронной литографии и проявления экспонированного рисунка в проявителе;

3) напыление пленки стойкого к щелочному травлению металла толщиной не более 50 нм на пластину с рисунком туннельных электродов с последующим удалением оставшегося резиста и пленки металла на нем растворителем, в результате чего получают пластину с металлическими выступами, представляющими собой туннельные электроды, расположенные с зазором между торцами;

4) нанесение пленки ЭРП на полученную пластину с туннельными электродами и формирование рисунка маски с обеспечением покрытия маской туннельных электродов и зазора между ними в слое резиста посредством электронной литографии и проявления экспонированного рисунка;

5) напыление пленки маскирующего материала толщиной не менее 5 нм на пластину с рисунком туннельных электродов с последующим удалением оставшегося резиста и пленки металла на нем посредством помещения пластины в растворитель, в результате чего получают на пластине маску, покрывающую туннельные электроды и зазор между ними;

6) удаление верхнего слоя кремния пластины КНИ посредством анизотропного реактивно-ионного травления, при этом слой кремния остается только в местах, которые были защищены маской, включая туннельные электроды и зазор между ними, а слой маски выступает за границы оставшегося слоя кремния на расстояние не более 10 нм;

7) нанесение пленки ЭРП на полученную пластину с туннельными электродами с последующим формированием щели в полученном слое резиста в виде полосы, ориентированной под углом к линии расположения туннельных электродов, с использованием метода электронной литографии и проявления;

8) напыление слоя стойкого металла в сформированную щель с образованием управляющих электродов и удаление растворителем остатков резиста с пленкой металла на нем;

9) растворение маски с остатками стойкого металла в щелочном травителе.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что слой наносимого резиста на каждом этапе составляет не более 300 нм.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что в качестве ЭРП может быть использован полиметилметакрилат (ПММА), ZEP 520A или AR-P 6200.

4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что в качестве проявителя для проявления экспонированного рисунка используют водно-спиртовой раствор изопропанола в соотношении 3:97 или MIBK : IPA (метилизобутилкетон, изопропанол) в соотношении 1:3, при этом пластину выдерживают в проявителе не менее 30 с при комнатной температуре.

5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что в качестве растворителя используют ацетон или н-метилпирролидон.

6. Способ по п. 1, отличающийся тем, что в качестве стойкого металла используют титан или хром.

7. Способ по п. 1, отличающийся тем, что в качестве стойкого металла при формировании туннельных электродов используют хром, а при формировании управляющих электродов используют титан, или наоборот.

8. Способ по п. 1, отличающийся тем, что толщина слоя маски составляет не менее 5 нм.

9. Способ по п. 1, отличающийся тем, что в качестве маскирующего материала используют алюминий или оксид алюминия.

10. Способ по п. 1, отличающийся тем, что толщина верхнего слоя кремния КНИ составляет 50 нм.

11. Способ по п. 1, отличающийся тем, что напыление пленки стойкого металла или маскирующего материала выполняют методом электронно-лучевого или термического испарения.

12. Одноэлектронный одноатомный транзистор с открытым каналом, отличающийся тем, что он получен способом по п. 1, при этом управляющие электроды транзистора

удалены от острова транзистора не более чем на 5-50 нм.

5

10

15

20

25

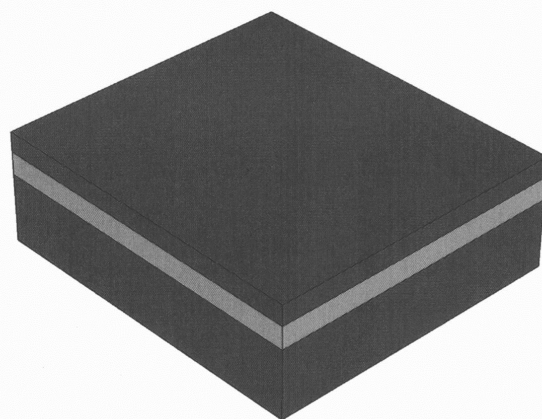
30

35

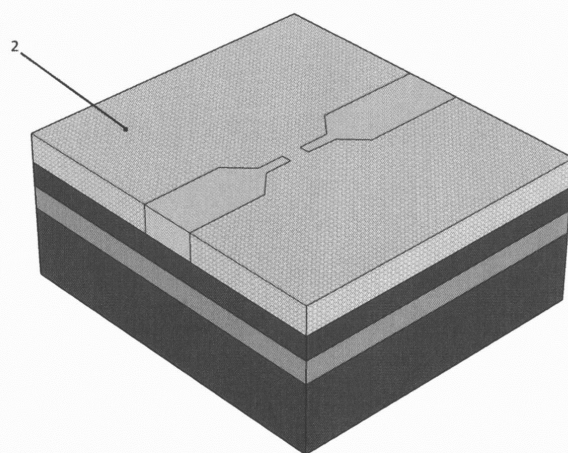
40

45

1

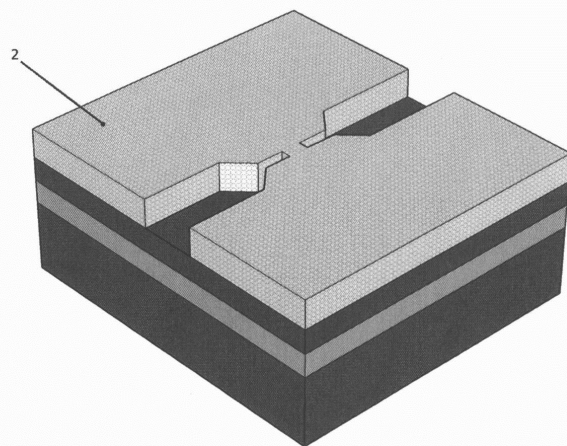


Фиг.1

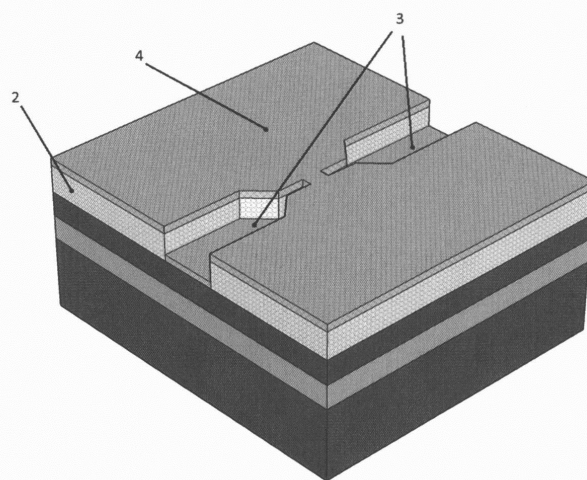


Фиг.2

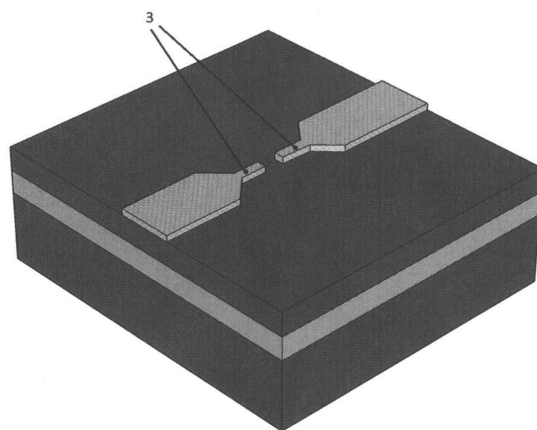
2



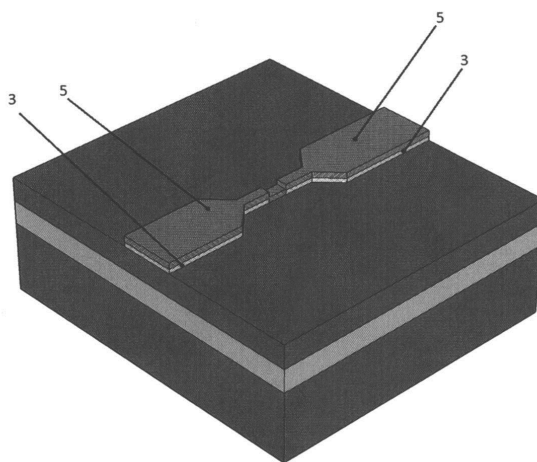
Фиг.3



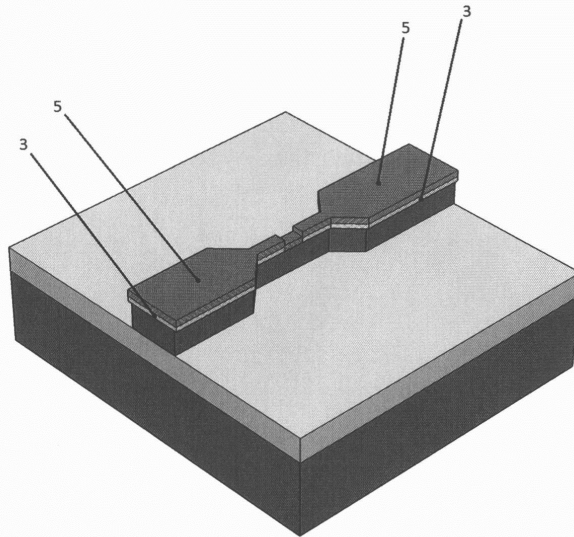
Фиг.4



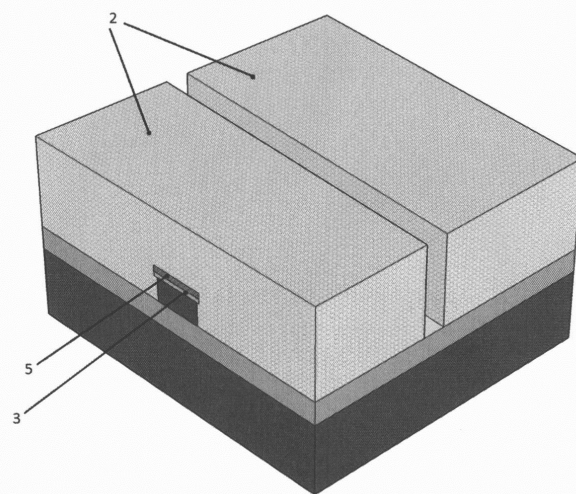
Фиг.5



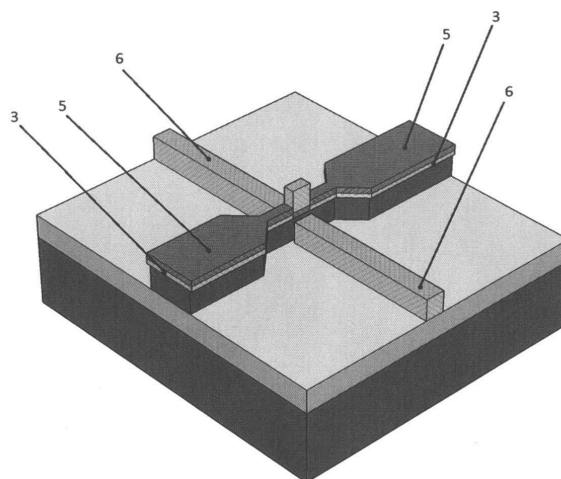
Фиг.6



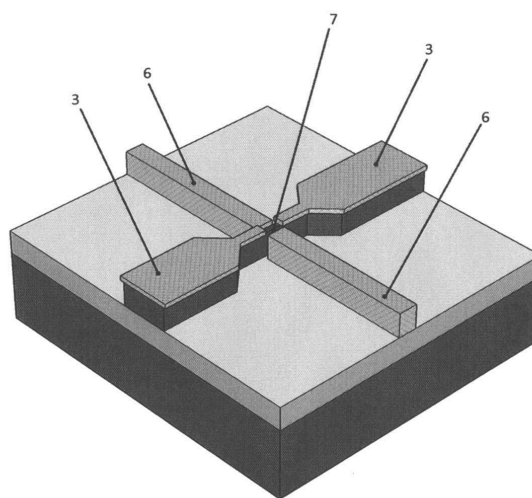
Фиг.7



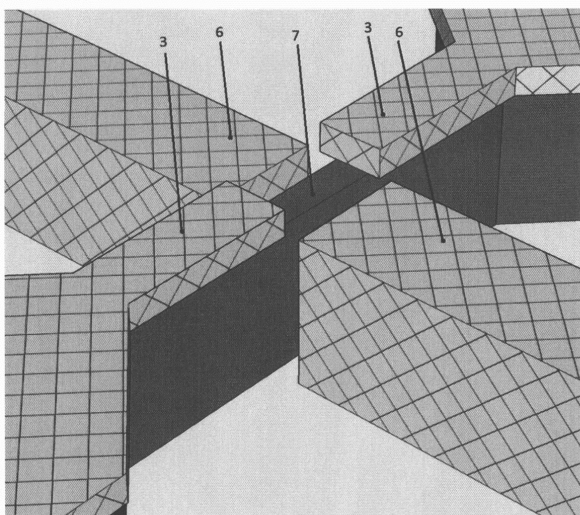
Фиг.8



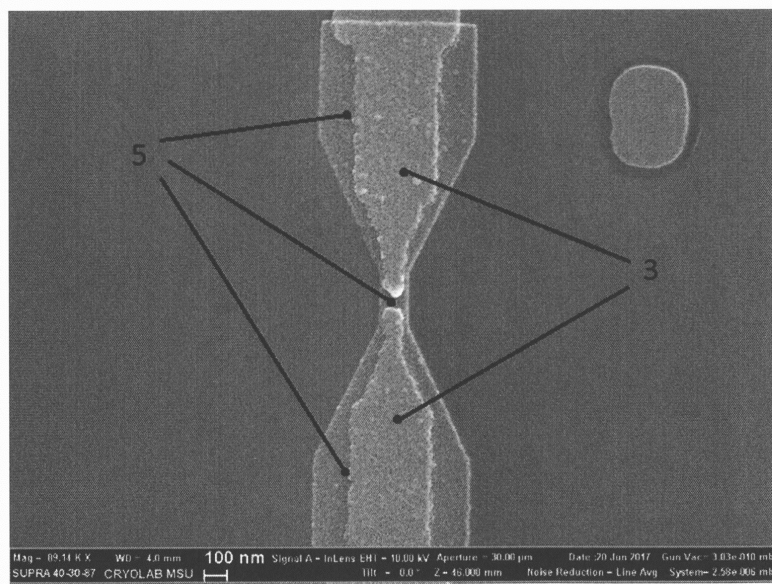
Фиг.9



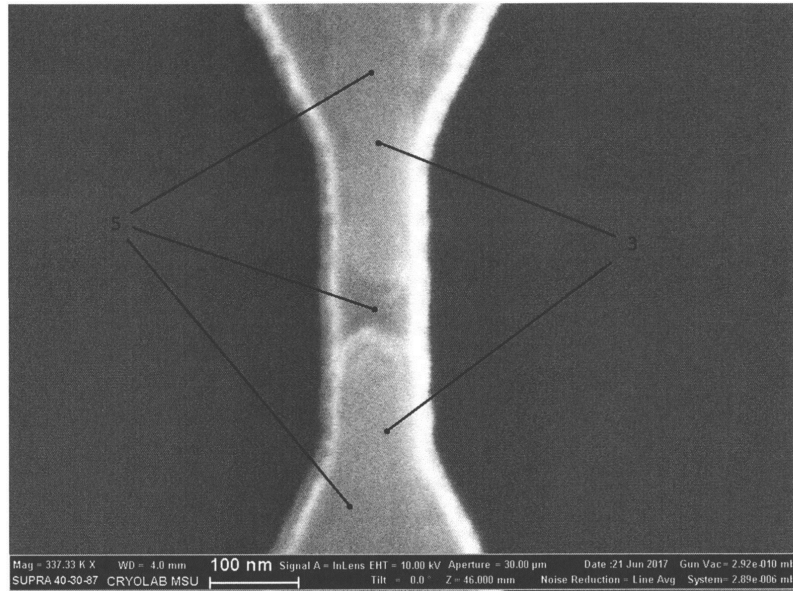
Фиг.10



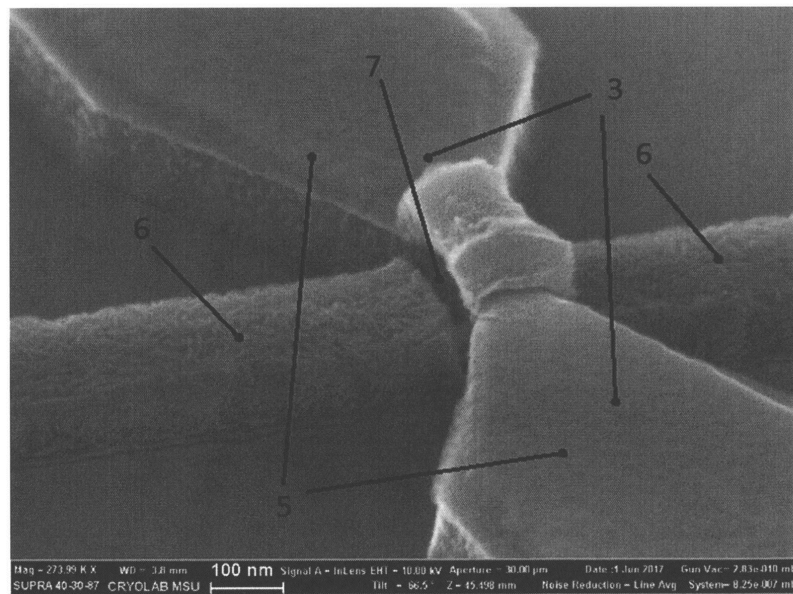
Фиг.11



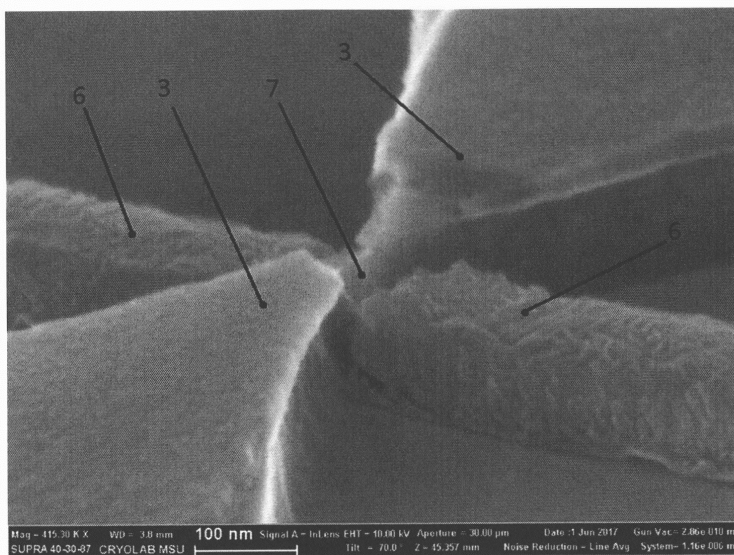
Фиг.12



Фиг.13



Фиг.14



Фиг.15