



(51) МПК
G01Q 70/00 (2010.01)
H01L 29/772 (2006.01)
B82Y 40/00 (2011.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012157611/28, 27.12.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 27.12.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 27.12.2012

(43) Дата публикации заявки: 10.07.2014 Бюл. № 19

(45) Опубликовано: 20.01.2015 Бюл. № 2

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: WO 2011/038228 A1, 31.03.2011. WO 2008/051316 A2, 02.05.2008. WO 02/48701 A2, 20.06.2001. US 7344908 B2, 18.03.2008. US 7301199 B2, 27.11.2007. JP 2005229017 A, 25.08.2005. RU 2061233 C1, 27.05.1996

Адрес для переписки:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1.МГУ
 им. М.В. Ломоносова, Центр трансфера
 технологий, Дьяченко О.Г.

(72) Автор(ы):

СОЛОВЬЕВ Игорь Игоревич (RU),
 ДЕВЯТОВ Игорь Альфатович (RU),
 КРУПЕНИН Владимир Александрович
 (RU),
 ПРЕСНОВ Денис Евгеньевич (RU),
 ТРИФОНОВ Артем Сергеевич (RU),
 АМИТОНОВ Сергей Владимирович (RU),
 КРУТИЦКИЙ Павел Александрович (RU),
 КОЛЫБАСОВА Валентина Викторовна
 (RU)

(73) Патентообладатель(и):

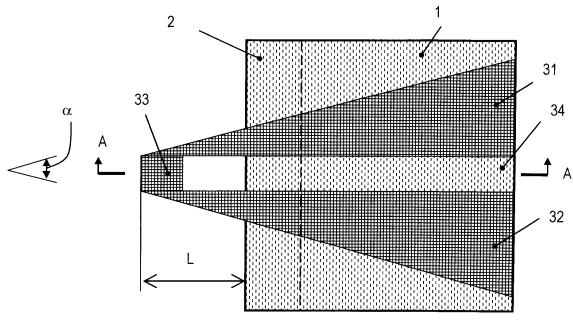
Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 профессионального образования
 "Московский государственный университет
 имени М.В. Ломоносова" (МГУ) (RU)

(54) ЗОНД НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С НАНОРАЗМЕРНЫМ КАНАЛОМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике, представляет собой зонд на основе полевого транзистора с наноразмерным каналом и может быть использовано при определении физико-химических и электрических параметров наноразмерных объектов физической, химической и биологической природы. Зонд включает наноразмерный чувствительный элемент, размещенный на острие и образующий канал транзистора, электроды, размещенные по одну сторону от острия, связанные с чувствительным элементом и выполняющие функции стока и истока транзистора. Чувствительный элемент выполнен в тонкопленочной структуре кремний-на-изоляторе, образованной на подложке. Слой кремния имеет градиентно изменяющуюся концентрацию легирующей примеси и выполнен

так, что со стороны свободной поверхности, по меньшей мере на половине толщины, обладает металлической, а на оставшейся толщине до слоя изолятора - полупроводниковой проводимостью. Электроды выполнены на упомянутой свободной поверхности, разделены зазором и имеют сужающуюся к острию площадь, а чувствительный элемент представляет собой размещенный между электродами фрагмент слоя кремния, имеющего полупроводниковую проводимость, образованный путем удаления части кремния, имеющего металлическую проводимость. Техническим результатом является улучшение пространственного разрешения зонда при сохранении чувствительности и упрощении технологии изготовления. 6 з.п. ф-лы, 8 ил.



ФИГ. 1

RU 2539677 C2

RU 2539677 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
G01Q 70/00 (2010.01)
H01L 29/772 (2006.01)
B82Y 40/00 (2011.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2012157611/28, 27.12.2012
(24) Effective date for property rights:
27.12.2012
Priority:
(22) Date of filing: 27.12.2012
(43) Application published: 10.07.2014 Bull. № 19
(45) Date of publication: 20.01.2015 Bull. № 2
Mail address:
119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1.MGU im.
M.V. Lomonosova, Tsentr transfera tekhnologij,
D'jachenko O.G.

(72) Inventor(s):
SOLOVE'V Igor' Igorevich (RU),
DEVJaTOV Igor' Al'fatovich (RU),
KRUPENIN Vladimir Aleksandrovich (RU),
PRESNOV Denis Evgen'evich (RU),
TRIFONOV Artem Sergeevich (RU),
AMITONOV Sergej Vladimirovich (RU),
KRUTITsKIJ Pavel Aleksandrovich (RU),
KOLYBASOVA Valentina Viktorovna (RU)
(73) Proprietor(s):
Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovaniya "Moskovskij
gosudarstvennyj universitet imeni M.V.
Lomonosova" (MGU) (RU)

(54) **FET-BASED PROBE WITH NANODIMENSIONAL CHANNEL**

(57) Abstract:

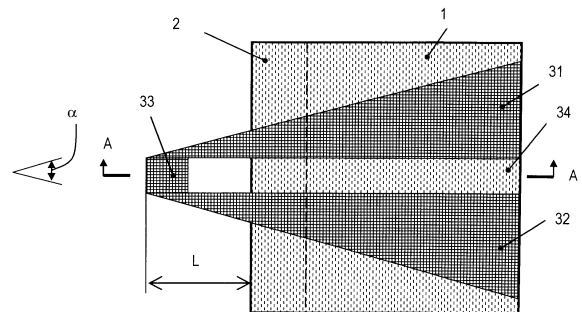
FIELD: instrumentation.

SUBSTANCE: invention relates to measuring equipment, it is a fet-based probe with a nanodimensional channel and can be used for the determination of physical and chemical and electric parameters of nanodimensional objects of the physical, chemical and biological nature. The probe includes the nanodimensional sensitive element placed on a tip and forming the transistor channels, electrodes placed from one side from the tip, connected with the sensitive element and which are functioning as a drain and a source of the transistor. The sensitive element is made in the thin-film structure silicon-on-insulator, formed on a substrate. The silicon layer has a gradient changing concentration of the alloying admixture and is made so that from a free surface, at least on a half of the thickness, it has metal, and on the remained thickness to the insulator layer - semiconductor conductivity. Electrodes are implemented on the named free surface,

divided by a gap and have the area which is narrowed towards the tip, and the sensitive element is a fragment of the silicon layer with semiconductor conductivity placed between the electrodes, formed by the removal of a part of the silicon with metal conductivity.

EFFECT: improvement of the spatial resolution of the probe at keeping of sensitivity and simplification of manufacturing techniques.

7 cl, 8 dwg



ФИГ. 1

RU 2 539 677 C2

RU 2 539 677 C2

Изобретение относится к измерительной технике и микронанoeлектронике и может быть использовано при определении физико-химических и электрических параметров наноразмерных объектов физической, химической и биологической природы.

Известно, что полупроводниковый полевой транзистор с каналом-нанопроводом (т.н. нанотранзистор или НТ) обладает исключительной чувствительностью к изменению электрического потенциала вблизи поверхности канала. Показано, что сенсоры на основе НТ позволяют с высокой точностью детектировать клеточную активность, определять исключительно низкие концентрации элементов биологических сред, рН молекул аналита без применения дополнительных маркеров с большей чувствительностью и за меньшее время, чем традиционные приборы. По своим электротехническим свойствам биосенсор на основе НТ представляет собой трехполюсное устройство (см., например, К.-I. Chena, В.-R. Li, Y.-T. Chen, "Silicon nanowire field-effect transistor-based biosensors for biomedical diagnosis and cellular recording investigation", Nano Today, 6 (2011), 131-154). Электрод затвора изменяет проводимость канала, а электроды стока и истока, примыкающие к каналу, позволяют считывать это изменение. Биологические рецепторы, иммобилизованные на поверхности канала-нанопровода посредством химической модификации его поверхности, необходимы для высокоспецифичного распознавания и высокоаффинного связывания с частицами аналита в буферном растворе. Взаимодействие рецепторов и аналита изменяет поверхностный потенциал полупроводникового канала-нанопровода, вызывая модуляцию его проводимости, которая может быть выделена детектирующей системой.

В патенте US 7662652 (B2), ZHOU CHONGWU, 16.02.2010 описан сенсор для регистрации параметров химических или биологических сред на основе НТ с чувствительным элементом - нанопроводом из оксида индия диаметром 10-30 нм, размещенным на структуре SiO₂/Si. Концы нанопровода являются стоком и истоком, а слой кремния - затвором. Описано выполнение канала биосенсора НТ на основе углеродных нанотрубок (JP 2004347532 (A), MATSUMOTO KAZUHIKO et al., 09.12.2004; US 7854826 B2, So et al., 21.12.2010), а в изобретении по патенту (US 7858965 B2, Lu, et al., 28.12.2010) - с использованием гетероструктур, включающих сердцевину из нелегированного германия и оболочку из кремния, контактирующих с металлическим электродом с образованием переходов Шоттки. В патенте (US 8232584, Lieber, et al., 31.07.2012) описаны сенсоры с использованием нанопроводов, выполненных из полупроводников n- и p-типа, образующих чувствительную решетку, заряд на которой зависит от вида иммобилизуемых клеточных структур. Описана конструкция чувствительной решетки, образованной совокупностью НТ (US 8115198 B2, Bondavalli et al.). В заявке (EP 2378559A1, Nakamura et al., 19.10.2011) описана технология изготовления НТ как интегрального компонента на основе структуры SiO₂/Si и углеродных нанотрубок. В изобретении US 2011316565 (A1), GUO DECHAO et al., 29.12.2011, описана компоновка и технология изготовления НТ на структуре кремний-на-изоляторе с нанопроводом толщиной менее 10 нм, использованием пленок нитрида кремния и образованием переходов Шоттки.

Описанные выше решения, несмотря на их принадлежность к высокочувствительному анализу с использованием наноразмерных миниатюрных НТ, не предназначены для зондовых измерений непосредственно в самом контролируемом биохимическом объекте, например в живой клетке. Для этого необходим зонд, чувствительный элемент которого обладает нанометровыми размерами.

Предпринимаются различные технологические решения, которые направлены на повышение разрешающей способности путем уменьшения размеров чувствительного

элемента сенсора при сохранении чувствительности НТ.

В статье Tian B, Cohen-karni T, Qing Q, Duan X, Xie P, et al., Three-dimensional, flexible nanoscale field-effect transistors as localized bioprobes. Science 329: 830-834 (2010) описаны эксперименты по введению зонда сенсора внутрь клетки и записи внутриклеточных потенциалов. Зонд НТ представляет собой изогнутый по острым углом $\sim 60^\circ$ нанопровод, в теле которого методами микроэлектронной технологии образован НТ. Токоподводы прикреплены к концам нанопровода.

В статье Duan X, Gao R, Xie P, Cohen-karni T, Qing Q, et al., Intracellular recordings of action potentials by an extracellular nanoscale field-effect transistor. Nature Nanotechnology, v.7: 174-179 (2012), описана конструкция, в которой зонд образован на выращенном отростке нанопровода из германия с образованием гетероструктуры Ge/Si и кремниевой нанотрубки. В патенте (US 7301199 (B2), LIEBER et al., 27.11.2007) указывалось, что управление электрофизическими параметрами нанопровода в процессе его выращивания путем допирования полупроводника различными примесями по длине и радиусу с регулированием концентрации, изменением типа проводимости и т.п. является весьма рутинной процедурой в технологии микроэлектроники.

Наиболее близким к патентуемому является НТ, описанный в заявке "BENT NANOWIRES AND RELATED PROBING OF SPECIES» (WO 2011038228 (A1), TIAN BOZHI et al., HARVARD COLLEGE, 31.03.2011- ближайший аналог). Нанопровод размещен на подложке. В средней своей части нанопровод изогнут под острым углом с образованием чувствительного острия зонда. Линейные участки нанопровода выполняют функции стока и истока полевого транзистора, который образован локальным допированием одного из линейных участков. К концам нанопровода присоединены контактные площадки для подключения к схеме регистрации. Размер зонда острия составляет 0,01-5% от длины линейного участка нанопровода. Зонд может быть использован для измерения электрических потенциалов непосредственно клеток, а улучшение его введения обеспечено модификацией петли фосфолипидами.

Однако создание НТ на основе выращенного полупроводникового нанопровода путем допирования его локальной области в процессе формирования является чрезвычайно сложным и трудоемким процессом, обусловленным его многоступенчатостью и нетехнологичностью - выращивание нанопровода, перемещение нанопровода на подложку, формирование контактов к нанопроводу. Отмеченное делает процесс изготовления НТ уникальным, затратным и несовместимым с традиционной кремниевой технологией. При этом дальнейшее формирование зонда на основе нанопровода еще более усложняет задачу изготовления конечного устройства.

Патентуемое изобретение лишено указанных недостатков и направлено на возможность реализации зонда на основе НТ заостренной формы с локализованной чувствительной областью - каналом на его острие.

Зонд на основе полевого транзистора включает наноразмерный чувствительный элемент, размещенный на острие и образующий канал транзистора, электроды, размещенные по одну сторону от острия, связанные с чувствительным элементом и выполняющие функции стока и истока транзистора.

Отличие состоит в том, что чувствительный элемент выполнен в тонкопленочной структуре кремний-на-изоляторе, образованной на подложке. Слой кремния имеет градиентно изменяющуюся концентрацию легирующей примеси и выполнен так, что со стороны свободной поверхности, по меньшей мере на половине толщины, обладает металлической, а на оставшейся толщине до слоя изолятора - полупроводниковой проводимостью. Электроды выполнены на упомянутой свободной поверхности,

разделены зазором и имеют сужающуюся к острию площадь, а чувствительный элемент представляет собой размещенный между электродами фрагмент слоя кремния, имеющего полупроводниковую проводимость, образованный путем удаления части кремния, имеющего металлическую проводимость.

5 Зонд может характеризоваться тем, что концентрация легирующей примеси в слое кремния с металлической проводимостью составляет 10^{19} - 10^{21} см⁻³, а в слое p-типа кремния с полупроводниковой проводимостью - 10^{14} - 10^{15} см⁻³, а также тем, что структура кремний-на-изоляторе представляет собой слой кремния толщиной 50-100 нм, размещенный на слое двуокиси кремния толщиной 150-200 нм на подложке из кремния толщиной 0,30-0,75 мм.

Зонд может характеризоваться и тем, что размещенный между электродами фрагмент слоя кремния, имеющего полупроводниковую проводимость, имеет размер между электродами $w=10$ -50 нм, толщину $t=10$ -50 нм и ширину $s=10$ -50 нм, а также и тем, что угол схождения электродов лежит в диапазоне α от 45 до 160°, преимущественно 90°.

15 Зонд может характеризоваться, кроме того, тем, что ребро подложки из кремния со стороны острия зонда скошено, а также тем, что размещенный на острие зонда чувствительный элемент совмещен со слоем изолятора и выступает за пределы подложки.

20 Технический результат - улучшение пространственного разрешения зонда при сохранении чувствительности и упрощении технологии изготовления.

Существо изобретения поясняется чертежами, где на

фиг.1 показана топология зонда, вид сверху;

фиг.2 - вид сбоку фиг.1, сечение по А-А;

25 фиг.3 - вид на зонд со стороны острия;

фиг.4 - распределение концентрации примеси по толщине слоя кремния;

фиг.5 - вариант топологии зонда, вид сверху;

фиг.6 - вид сбоку фиг.5, сечение по А-А;

фиг.7 - вариант топологии острия;

30 фиг.8 - вольт-амперные (а) и затворные (б) характеристики НТ.

На фиг.1-3 представлено схематическое изображение чувствительной части зонда. Зонд выполнен на основе структуры кремний-на-изоляторе (КНИ), где на подложке 1 из кремния толщиной 0,3-0,75 мм, который определяется типом пластины КНИ, образован слой 2 изолятора. На поверхности слоя 2 выполнен слой 3 кремния толщиной 30-100 нм. Слой 3 кремния легирован (допирован) примесью, например бором, градиентно с изменением концентрации по толщине от примерно 10^{21} см⁻³ (с внешней стороны) до примерно 10^{14} - 10^{15} см⁻³ (со стороны слоя 2), что обеспечивает тип и величину проводимости, позволяющие сформировать в части слоя полупроводниковый наноразмерный канал с заданными электрофизическими характеристиками. Сильно легированный слой, по существу обладающий металлической проводимостью, выполняет функции электродов 31 и 32 для наноразмерного профилированного канала 33.

45 Электроды 31 и 32 выполняют функции стока и истока НТ. Размер зазора 34 между электродами выбирается исходя из возможностей технологии. Канал 33 выполнен с меньшей толщиной t , чем толщина h слоя 3 кремния в области электродов 31 и 32, обеспечивая меньшую проводимость на этом локальном участке. Например, если толщина h слоя 3 составляет около 100 мкм, то t может достигать половины от этой величины - 50 нм и менее. Размер w оконечности канала 33 не регламентируется и

определяется технологическими возможностями и может составлять 10-50 нм. Размер s - ширина канала 33 в направлении удаления от вершины острия зонда не регламентируется, определяется технологическими возможностями и может составлять 10-50 нм.

5 Острый угол α при вершине канала 33 выбирается из технологических соображений и его величина может находиться в диапазоне углов от 45 до 160°, преимущественно 90°. Расстояние L между подложкой 1 и оконечностью канала 33 определяется назначением зонда и может составлять величину 1-50 мкм.

10 Слой 2 изолятора по желанию может быть профилирован в соответствии с формой канала 33, которая в реальности будет отличаться от топологии, схематично представленной на фиг.1-3. Подложка может иметь скос 11 для расширения возможной зоны введения локального сенсора в зондируемый объект.

15 На фиг.4 схематично показано распределение концентрации примеси по глубине h слоя 3 кремния. Слой 3 легирован неоднородно: верхняя половина слоя имеет концентрацию примеси $C \sim 10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$, поэтому слой толщиной $(h-t)$ имеет практически металлическую проводимость. Оставшаяся часть слоя со стороны слоя 2 изолятора толщиной t оставлена практически нетронутой и обладает полупроводниковой проводимостью ($C \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Такое распределение примеси, в описываемом случае бора, достигается применением соответствующего режима быстрого термического отжига, используемого также для восстановления кристаллической структуры кремния, разрушенной в процессе имплантации.

20

На фиг.5, 6 показан вариант выполнения зонда, когда слой 21 изолятора сохранен как подслой в зоне канала 33. Так же как и в случае угла α , величина угла β может находиться в диапазоне углов от 45 до 160°, преимущественно 90°, что определяется локальностью измерений, требованиями к механической прочности, а также технологическими возможностями.

25

На фиг.7 показано выполнение чувствительной части зонда, когда оконечность 35 канала 33, так же как и слоя 22 изолятора, может иметь округлую форму.

30 Верхний высоколегированный слой кремния используется для формирования электродов стока и истока НТ, подводных электродов и контактных площадок.

На фиг.8,а показана зависимость транспортного тока I транзистора от напряжения исток-сток $V_{ИС}$ при различных напряжениях V_3 на затворе, затворные характеристики транзистора при различных напряжениях $V_{ИС}$ - фиг.8,б. Видно, что появляется управление током при изменении напряжения на затворе НТ.

35

Для изготовления структур используются пластины КНИ со следующими характеристиками - толщина верхнего слоя 50-100 нм, изолирующего диэлектрика - 150-200 нм, толщина подложки - кремниевой пластины 0,30-0,75 мм. Подложка и верхний слой кремния легированы бором (р-тип) и имеют удельное сопротивление 7-12 Ом·см.

40 Процесс формирования структуры в верхнем слое кремния на изоляторе включает в себя этапы электронной и оптической литографии, а также реактивно-ионного травления.

На первом этапе в верхнем слое кремния формируется тело транзистора с заостренным концом методом анизотропного травления кремния через алюминиевую маску и формируются маркеры для совмещения с электронной литографией второго этапа. На втором этапе на оконечности острия формируется чувствительная полупроводниковая область - канал транзистора. Процесс проводится с использованием электронной литографии с совмещением и последующим анизотропным травлением

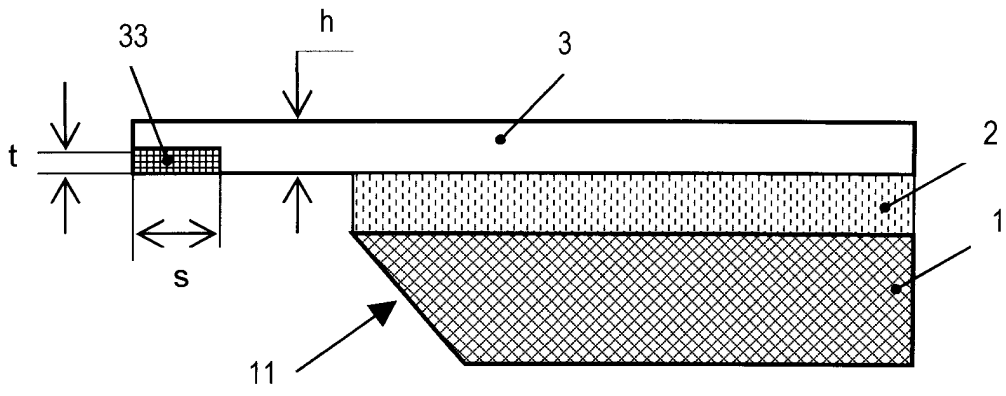
кремния через алюминиевую маску. Вытравливается верхняя высокодопированная часть слоя кремния и формируется канал с полупроводниковой проводимостью небольшой площади на острие тела транзистора.

5 Экспериментальный образец модифицируется в серии последовательных процессов изотропного травления до тех пор, пока не появляется управление транспортным током изменением напряжения на затворе транзистора (см. фиг.8). Основное назначение проводимых процессов травления - полное удаление верхнего, сильно легированного слоя кремния для формирования чувствительного полупроводникового наноразмерного канала полевого транзистора.

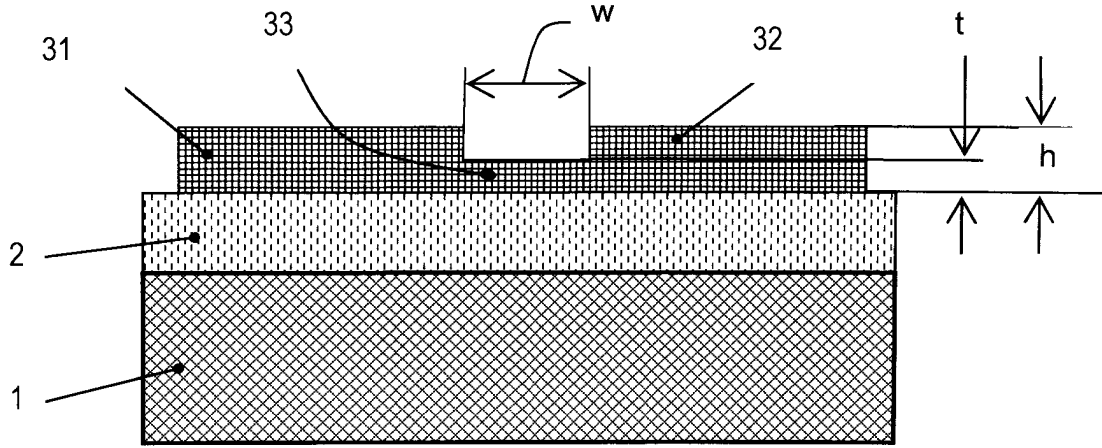
10 Патентуемая топология позволяет обеспечить технический результат - улучшение пространственного разрешения зонда до величины размера канала транзистора при сохранении чувствительности и упрощении технологии изготовления.

Формула изобретения

- 15 1. Зонд на основе полевого транзистора, включающий наноразмерный чувствительный элемент, размещенный на острие и образующий канал транзистора, электроды, размещенные по одну сторону от острия, связанные с чувствительным элементом и выполняющие функции стока и истока транзистора, отличающийся тем, что
- 20 чувствительный элемент выполнен в тонкопленочной структуре кремний-на-изоляторе, образованной на подложке, при этом
- слой кремния имеет градиентно изменяющуюся концентрацию легирующей примеси и выполнен так, что со стороны свободной поверхности, по меньшей мере на половине толщины, обладает металлической, а на оставшейся толщине до слоя изолятора -
- 25 полупроводниковой проводимостью, электроды выполнены на упомянутой свободной поверхности, разделены зазором и имеют сужающуюся к острию площадь, а чувствительный элемент представляет собой размещенный между электродами фрагмент слоя кремния, имеющего полупроводниковую проводимость, образованный путем удаления части кремния, имеющего металлическую проводимость.
- 30 2. Зонд по п.1, отличающийся тем, что концентрация легирующей примеси в слое кремния с металлической проводимостью составляет 10^{19} - 10^{21} см⁻³, а в слое р-типа кремния с полупроводниковой проводимостью - 10^{14} - 10^{15} см⁻³.
3. Зонд по п.1, отличающийся тем, что структура кремний-на-изоляторе представляет собой слой кремния толщиной 50-100 нм, размещенный на слое двуокиси кремния
- 35 толщиной 150-200 нм на подложке из кремния толщиной 0,30-0,75 мкм.
4. Зонд по п.1, отличающийся тем, что размещенный между электродами фрагмент слоя кремния, имеющего полупроводниковую проводимость, имеет размер между электродами $w=10$ -50 нм, толщину $t=10$ -50 нм и ширину $s=10$ -50 нм.
- 40 5. Зонд по п.1, отличающийся тем, что угол схождения электродов лежит в диапазоне α от 45 до 160°, преимущественно 90°.
6. Зонд по п.1, отличающийся тем, что ребро подложки из кремния со стороны острия зонда скошено.
7. Зонд по п.1, отличающийся тем, что размещенный на острие чувствительный элемент совмещен со слоем изолятора и выступает за пределы подложки.
- 45

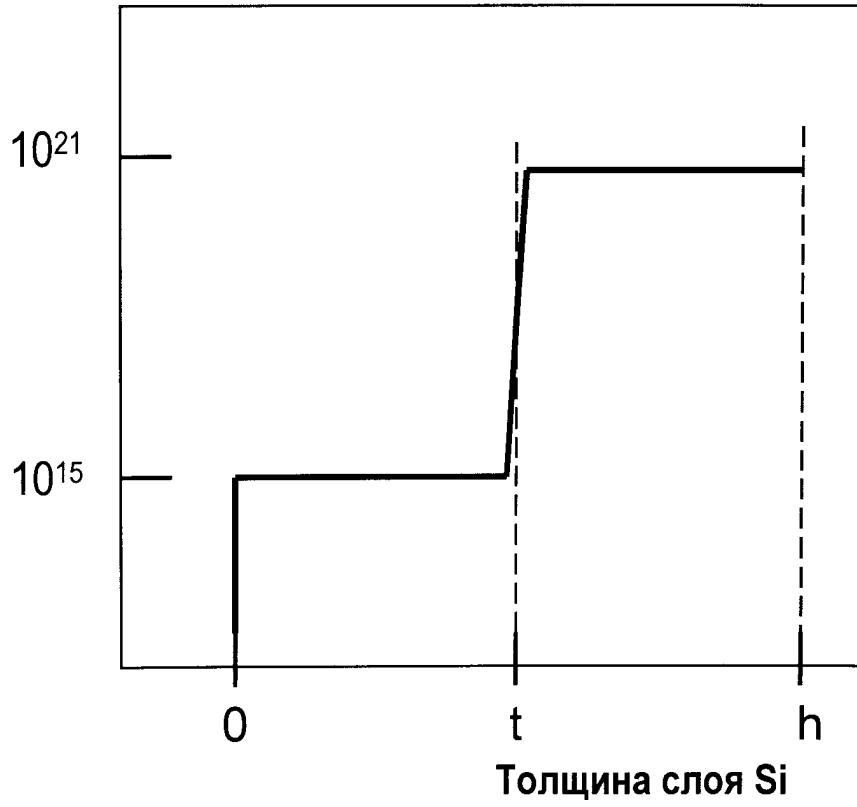


ФИГ. 2

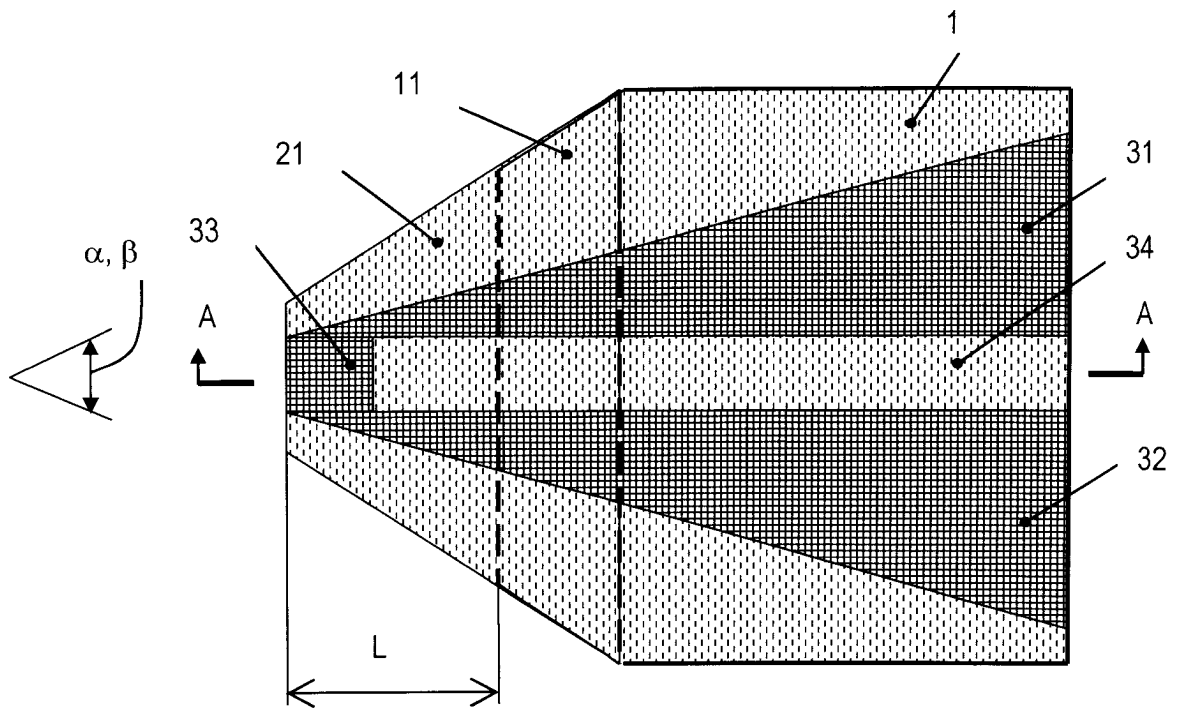


ФИГ. 3

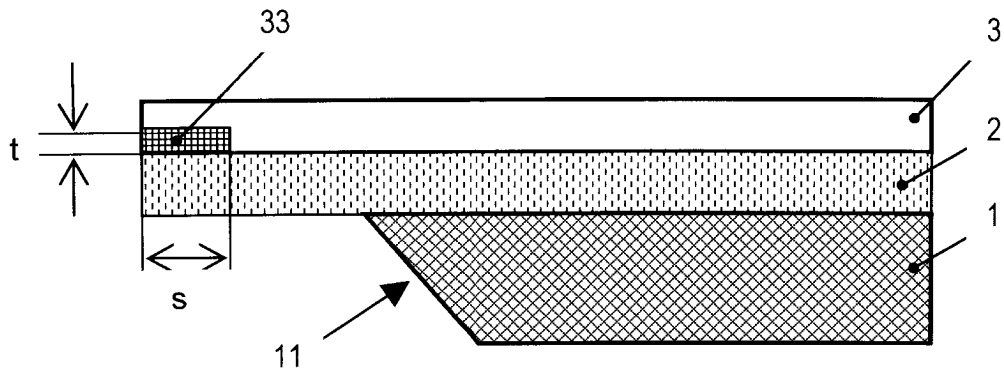
C, cm^{-3}



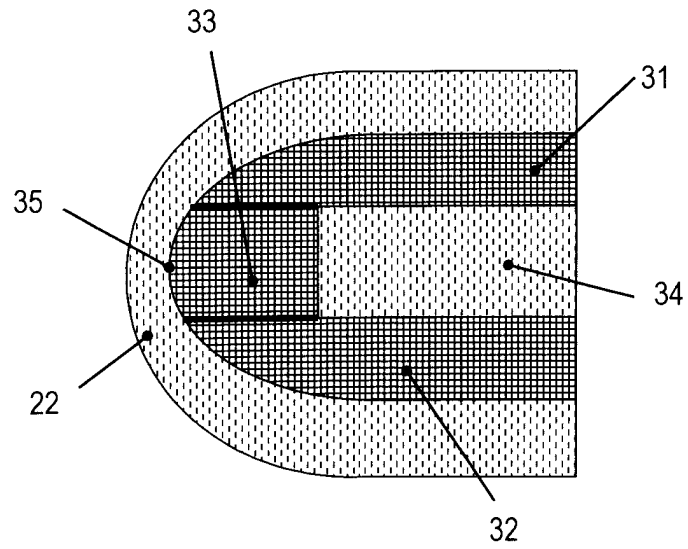
ФИГ. 4



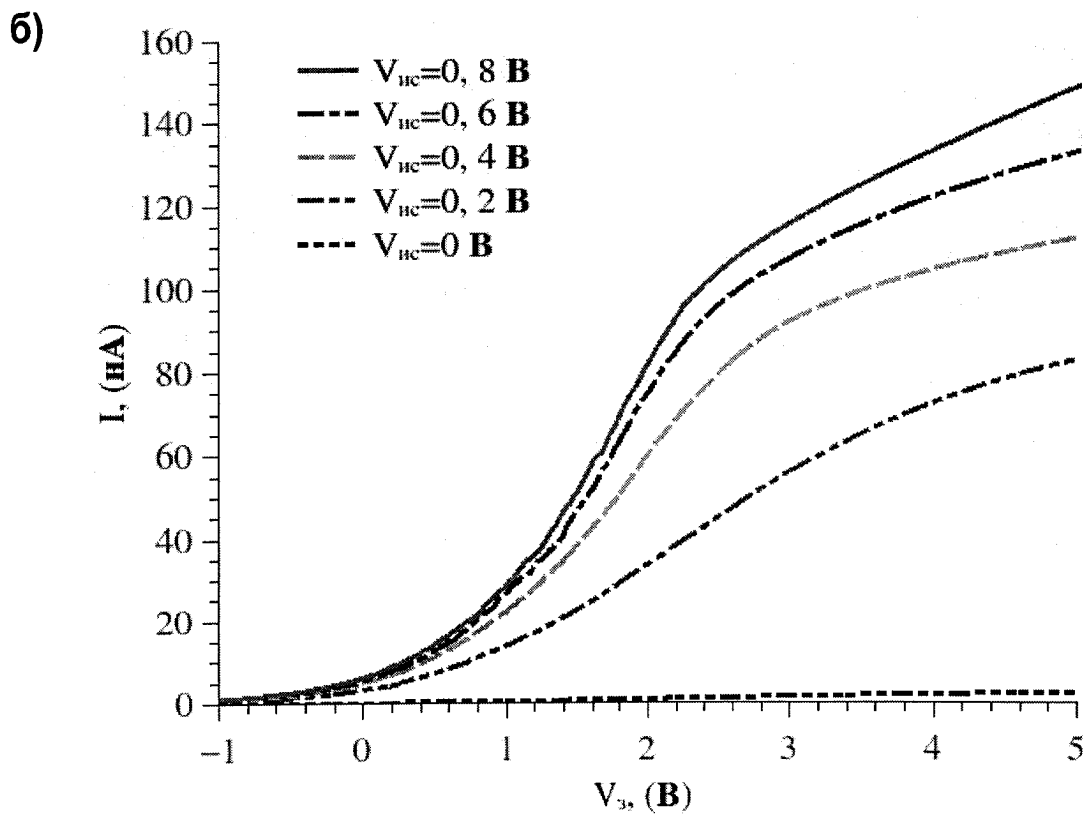
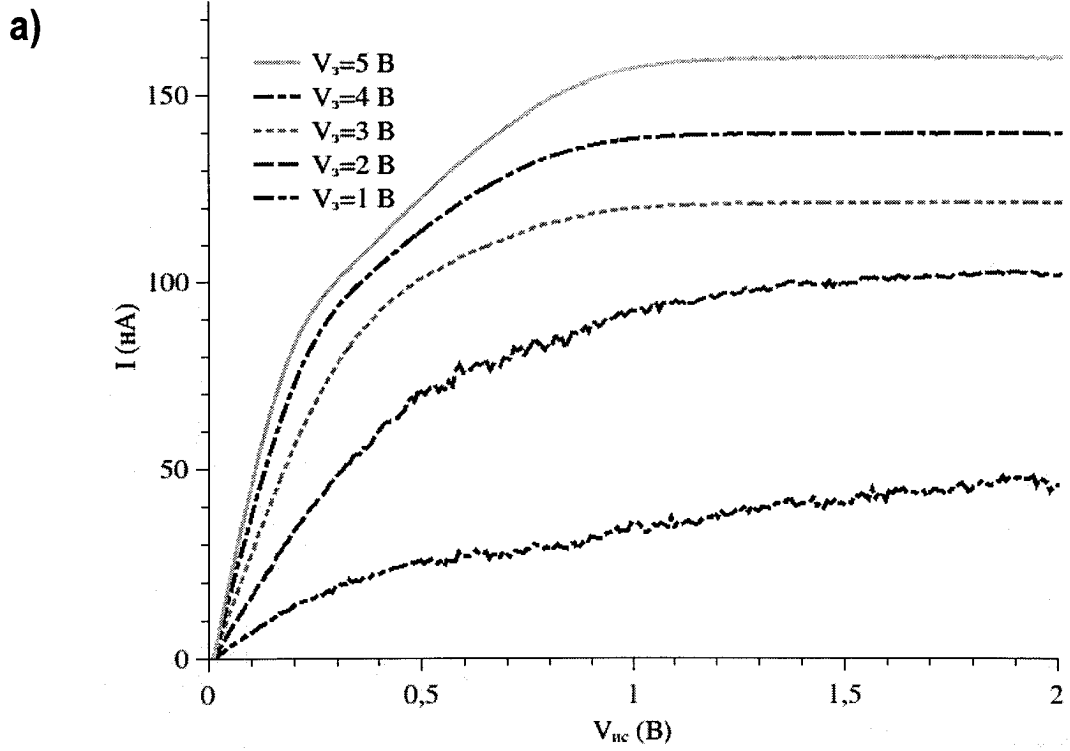
ФИГ. 5



ФИГ. 6



ФИГ. 7



ФИГ. 8