



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(51) МПК  
*G01Q 60/30* (2010.01)  
*G01Q 60/38* (2010.01)  
*B82Y 35/00* (2011.01)

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012120775/28, 21.05.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
21.05.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.05.2012

(45) Опубликовано: 27.01.2014 Бюл. № 3

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: US 7344908 B2, 18.03.2008. Brenning, H.T.A., Kubatkin, S.H., Erts, D., Kaianov, S.G., Bauch, T., Dclsing, P. "A single electron transistor on an atomic force microscope probe", Nano Letters, Volume 6, Issue 5, 2006, p.937-941. Suter, K., Akiyama, T., De Rooij, N.F., Huefner, M., Ihn, T., Stauffer, U. "Integration of a fabrication process for an (см. прод.)

Адрес для переписки:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1  
Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова, Центр трансфера  
технологий, О.Г.Дьяченко

(72) Автор(ы):

Крупенин Владимир Александрович (RU),  
Преснов Денис Евгеньевич (RU),  
Амионов Сергей Владимирович (RU),  
Снигирев Олег Васильевич (RU),  
Трифонов Артем Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

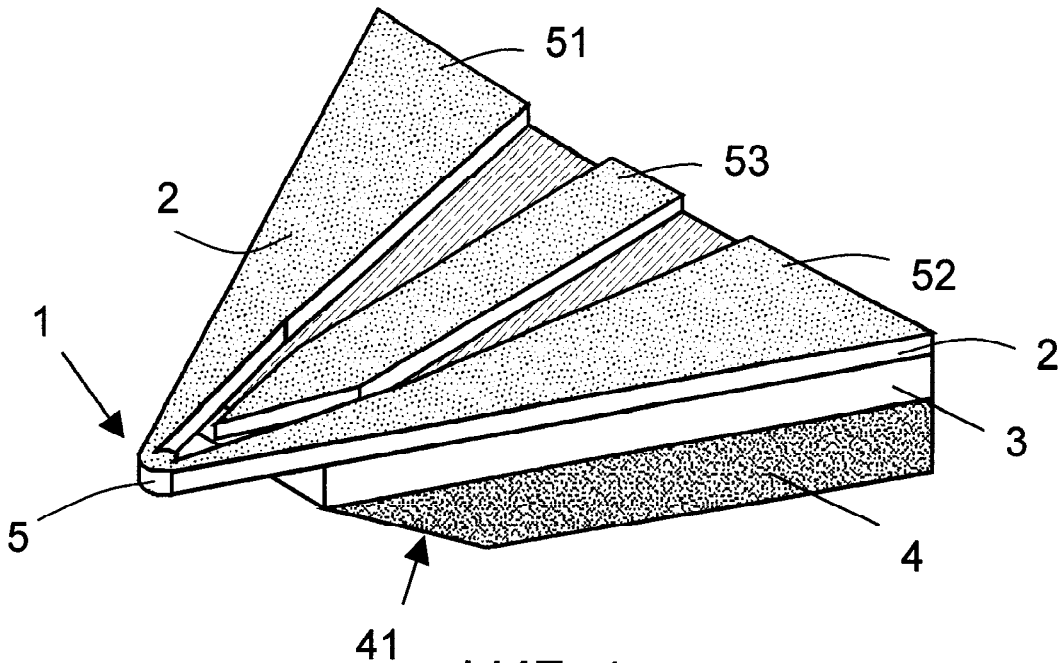
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова" (RU)

## (54) КАНТИЛЕВЕР С ОДНОЭЛЕКТРОННЫМ ТРАНЗИСТОРОМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

(57) Реферат:

Зонд для сканирующего зондового микроскопа включает размещенный на острие кантилевера зарядовый сенсор в виде одноэлектронного транзистора, выполненного в слое кремния, допированном примесью до состояния вырождения, структуры кремний-на-изоляторе (КНИ) на подложке. Транзистор имеет два подводящих электрода, размещенные под острым углом друг к другу в плоскости подложки, сходящиеся концы которых контактируют с проводящим островом транзистора и выполняют функции истока и стока, и средний электрод заостренной формы, размещенный в зоне схождения подводящих электродов, острие которого направлено в сторону проводящего

острова с образованием емкостного зазора с последним, выполняющий функции затвора транзистора. Перемычки в зоне контакта концов подводящих электродов с островом транзистора выполнены резистивными с возможностью образования туннельного перехода, ребро подложки скошено, а остров транзистора, перемычки и примыкающие к скосу оконечные части подводящих и среднего электродов выступают за пределы слоя изолятора. Технический результат состоит в исключении паразитного шумового влияния подвижных зарядов, сосредоточенных в слое изолятора пластины КНИ, увеличение зарядовой чувствительности зондового устройства. 4 з.п. ф-лы, 6 ил.



ФИГ. 1

(56) (продолжение):

aluminum single-electron transistor and a scanning force probe for tuning-fork-based probe microscopy", Journal of Microelectromechanical Systems, Volume 19, Issue 5, 2010, p.1088-1097. Hess, H.F., Fulton, T.A., Yoo, M.J., Yacoby, A. "Microscopy with a single electron transistor probe", Solid State Communications, Volume 107, Issue 11, 1998, p.657-661. KR 2006000809 A, 06.01.2006.

RU 2505823 C1

RU 2505823 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*G01Q 60/30* (2010.01)  
*G01Q 60/38* (2010.01)  
*B82Y 35/00* (2011.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2012120775/28, 21.05.2012

(24) Effective date for property rights:  
21.05.2012

Priority:

(22) Date of filing: 21.05.2012

(45) Date of publication: 27.01.2014 Bull. 3

Mail address:

119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1  
Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni  
M.V.Lomonosova, Tsentr transfera tekhnologij,  
O.G.D'jachenko

(72) Inventor(s):

**Krupenin Vladimir Aleksandrovich (RU),  
Presnov Denis Evgen'evich (RU),  
Amitonov Sergej Vladimirovich (RU),  
Snigirev Oleg Vasil'evich (RU),  
Trifonov Artem Sergeevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe  
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego  
professional'nogo obrazovanija "Moskovskij  
gosudarstvennyj universitet imeni M.V.  
Lomonosova" (RU)**

(54) **CANTILEVER WITH SINGLE-ELECTRODE TRANSISTOR FOR PROBING MICROSCOPY**

(57) Abstract:

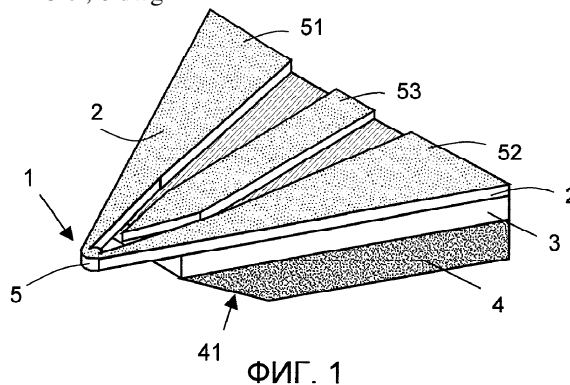
FIELD: instrumentation.

SUBSTANCE: probe for scanning probe microscope comprises charge sensor arranged at cantilever tip and composed of single-electrode transistor made in silicon layer doped to degenerate state of silicon-on-insulator (SOI) structure on substrate. Transistor has two feed electrodes arranged at acute angle to each other in substrate plate with converging ends staying in contact with transistor feed island to make transistor source and drain, two sharpened mid electrode arranged in the area of convergence of feed electrodes, its tip being directed towards conducting island to make capacitance clearance with the latter acting as transistor gate. Jumpers in zone of contact of feed electrode ends with transistor feed island represent resistor elements to make tunnel transition. Note here that substrate edge is skewed while transistor

island, jumpers and feed and mid electrode ends adjoining said skew extend beyond the insulator layer.

EFFECT: ruled out parasitic noise effects of moving charges concentrated in SOI plate insulator layer, higher charge sensitivity of probe.

5 cl, 6 dwg



RU 2 505 823 C1

RU 2 505 823 C1

Изобретение относится к измерительной технике, а именно к зондовой микроскопии, и может быть использовано в нанoeлектронике и материаловедении.

Зондовая микроскопия высокого разрешения основана на бесконтактном съеме информации при взаимодействии наноразмерных зондов с поверхностью исследуемого объекта и может применяться как в сканирующем варианте, так и в локальном. Она позволяет выявить топологию рельефа, определить электрические и магнитные свойства поверхности и отдельных объектов.

Известны различные конструкции кантилеверов, использующих образованные на острие зонда сверхчувствительные зарядовые полупроводниковые наноструктуры, которые выполняют функции считывающих и сенсорных элементов зондовой микроскопии. Конструирование направлено на повышение чувствительности, уменьшение размеров и создание приемлемой технологии изготовления зондов, чувствительных к состоянию поверхности. К таким наноструктурам, в частности, относятся одноэлектронные транзисторы, изготавливаемые методами нанoeлектроники.

Так, в ранних работах (см., например, M.J. Yoo et al., Science, v.276, pp.579-582, 1997 и др.) указывалось на возможность использования кантилевера с одноэлектронным транзистором для сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). В изобретении (US 6516281 B1, Wellstood et al., 04.02.2003) описывалась конструкция криостата для целей картирования температурных полей образца с использованием такого одноэлектронного транзистора, однако конструкция его не раскрывалась. Ряд публикаций посвящен кантилеверам с использованием полевых транзисторов, выполненных на структуре SOI (кремний-на-изоляторе, далее «КНИ») (см., например, Moon Suhk Suh et al., Applied Phys. Letters, v.83, pp 386-388, 2003). В указанной работе указывалась возможность картирования потенциала на поверхности с разрешением менее 300 нм.

Принципы функционирования, топология и характеристики одноэлектронного транзистора известны. Одноэлектронный транзистор является самым чувствительным зарядовым сенсором из известных, принципы, лежащие в основе технологии его изготовления описаны. Так, в частности, технология изготовления такого транзистора на основе высокодопированного КНИ приведена в ст. Преснова Д.В. и др., ж. Радиотехника, т.1, 78-84 (2008). Пластины КНИ, изготовленные по технологии UniBond, имеют толщину верхнего слоя кремния - 55 нм, изолятора SiO<sub>2</sub>-140 нм. Верхний слой кремния легирован фосфором так, что проводящие свойства полупроводника становятся близки к металлическим. В этом слое высокодопированного кремния и формируется структура одноэлектронного транзистора.

В патенте (US 6703258 B2, Hopson et al., 09.03. 2004) описан кантилевер, кончик острия которого выполнен в форме совмещенного с усилителем зонда-транзистора, который предназначен для исследования зарядовых процессов в полупроводниковых приборах. В заявке (KR 20050022032 (A), CHOI YOUNG JIN et al., 07.03.2005) описана конструкция кантилевера для атомно-силового микроскопа, выполненного на КНИ, который содержит полевой транзистор со сформированным на его зонде наконечником из углерода, что, однако, технологически крайне сложно выполнить. В патенте (US 7335942 B2, Edinger et al, 26.02.2008) описан сенсор кантилевера на полевом транзисторе, выполненном на кремнии р-типа, области n-типа которого образованы на боковой поверхности самого острия. Однако такая конструкция сложна в изготовлении и имеет технологические ограничения размера зоны

чувствительности и соответственно разрешения.

Наиболее близким по техническому существу является зонд для сканирующего зондового микроскопа, а именно атомно-силового микроскопа (АСМ), включающий совмещенный с острием кантилевера зарядовый сенсор на основе транзистора, образованный на подложке в многослойной структуре КНИ (US 7344908, SUN MOON SUNK et al., KOREA ELECTRONICS TECHNOLOGY, 18.03.2008 - ближайший аналог).

Зонд образован на боковой поверхности элемента кантилевера в форме остроконечного пика, сенсор-транзистор которого сформирован на острие этого пика. Сенсор-транзистор, находящийся в контакте с поверхностью анализируемого объекта, имеет канал, и соединенные с ним сток и исток с отличным от подложки типом допирования.

Недостатком такого зонда является принципиальное ограничение в его разрешающей способности, определяемой размером канала транзистора, а также существенно меньшая зарядовая чувствительность по сравнению с одноэлектронными транзисторами.

Патентуемый зонд для сканирующего зондового микроскопа включает размещенный на острие кантилевера зарядовый сенсор в виде транзистора, выполненного в слое кремния структуры кремний-на-изоляторе на подложке.

Отличие состоит в том, что зарядовый сенсор образован в слое кремния, допированном примесью до состояния вырождения и представляет собой одноэлектронный транзистор, имеющий два подводящих электрода, размещенные под острым углом друг к другу в плоскости подложки, сходящиеся концы которых контактируют с проводящим островом транзистора и выполняют функции истока и стока, и средний электрод заостренной формы, размещенный в зоне схождения подводящих электродов, острие которого направлено в сторону проводящего острова с образованием емкостного зазора с последним, выполняющий функции затвора транзистора. Перемычки в зоне контакта концов подводящих электродов с островом транзистора выполнены резистивными с возможностью образования туннельного перехода, ребро подложки скошено, а остров транзистора, перемычки и примыкающие к скосу оконечные части подводящих и среднего электродов выступают за пределы слоя изолятора.

Зонд может характеризоваться тем, что угол между подводящими электродами лежит в диапазоне 20-160°, преимущественно 90°, а также тем, что слой кремния допирован примесями до концентрации, превышающей  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>, а его толщина составляет 5-50 нм.

Зонд может характеризоваться и тем, что линейный размер острова транзистора лежит в диапазоне 5-50 нм, а также и тем, что транзистор и балка кантилевера с острием выполнены за одно целое на подложке методами электронной литографии, реактивного ионного и изотропного травления.

Технический результат состоит в реализации одноэлектронного транзистора на игле кантилевера таким образом, чтобы исключить паразитное шумовое влияние подвижных зарядов, сосредоточенных в слое изолятора пластины КНИ, на которой и формируется транзистор. Это позволяет увеличить зарядовую чувствительность зондового устройства.

Сущность патентуемого изобретения поясняется на фигурах, где на:

фиг.1 представлена конструкция зонда в изометрии;

фиг.2, 3 - вид на область острова транзистора сверху и сбоку, соответственно;

фиг.4 - принцип работы в составе зондового микроскопа;

фиг.5, 6 - вольтамперные и модуляционные характеристики зонда с одноэлектронным транзистором.

На фиг.1-4 показана конструкция зонда для сканирующего зондового микроскопа, выполненная на КНИ. Зарядовый сенсор 1 образован в слое 2 кремния, легированном примесью (например, фосфором) до состояния вырождения; концентрация носителей превышает  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Слой 2 имеет толщину 5-50 нм и размещен на слое 3 изолятора, выполненного из  $\text{SiO}_2$  толщиной ~150 нм. Подложка 4 изготовлена из кремния, ее толщина (0,3-0,75 мм) определяется типом пластины КНИ. В области, примыкающей к сенсору 1, толщина подложки при необходимости может быть уменьшена до единиц и десятков микрон методом травления кремния.

Зарядовый сенсор 1 выполнен в виде одноэлектронного транзистора 5, и содержит два подводящих электрода 51 и 52, размещенный между ними средний электрод 53 и остров 54 транзистора. Электроды 51 и 52 размещены под острым углом а друг к другу в плоскости подложки 4, сходящиеся концы которых контактируют с проводящим островом 54 и выполняют функции истока и стока транзистора 5. Линейный размер острова 54 лежит в диапазоне от единиц до десятков нм и эта величина определяется возможностями технологии изготовления. Угол а между подводящими электродами 51, 52 составляет  $20-160^\circ$ , преимущественно  $90^\circ$ . Электрод 53 заостренной формы выполняет функцию затвора транзистора 5, размещен в зоне схождения подводящих электродов 51, 52. Острие 531 электрода 53 направлено в сторону острова 54, установлено с зазором, обеспечивая емкостную связь с островом 54.

Электроды 51, 52 стока и истока соединяются с островом 54 транзистора через узкие перемычки 55, сопротивление которых доводится до величины более 100 кОм путем их утоньшения методом изотропного травления всей структуры транзистора. В процессе изотропного травления уменьшается также и размер острова 54 транзистора, что улучшает его важный параметр - рабочую температуру.

Ребро 41 подложки 4 скошено, а остров 54 транзистора, обе перемычки 55 и примыкающая к скосу ребра 41 часть электродов 51, 52 и 53, выполненных в верхнем слое 2 кремния, выступают за пределы слоя 3 изолятора. Соответственно устраняется контакт острова 54 со слоем 3 изолятора, что и позволяет снизить уровень зарядового шума транзистора и повысить чувствительность зарядового сенсора в целом.

Транзистор 5, выполненный в слое 2 кремния пластины КНИ и выполняющий также и роль острия кантилевера, и балка кантилевера, выполненная из материала изолятора на подложке 4, могут быть сформированы как единое целое из пластины КНИ традиционными методами электронной литографии, реактивно-ионного и жидкостного травления.

Зонд патентуемой конструкции может быть использован в сканирующей зондовой микроскопии для измерения потенциальных и зарядовых профилей объектов с пространственным разрешением, определяемый размером острова 54 транзистора, его собственная зарядовая чувствительность может достигать величин  $10^{-4}-10^{-5} \text{ e/Hz}^{-1/2}$ .

Использование устройства удобно пояснить на примере функционирования зонда в составе АСМ (фиг.4). Кантилевер 6 помещают в держателе АСМ таким образом, чтобы зарядовый сенсор 1, т.е. остров 54 одноэлектронного транзистора 5, находился над исследуемым объектом 7. Питание и съем сигнала осуществляется посредством блока 8 задающей и измерительной электроники. При работе на электроды 51, 52 и 53 подаются соответствующие напряжения - на сток и исток ( $+V_b/2$  и  $-V_b/2$ ), а на затвор ( $V_g$ ).

Остров 54 является одновременно чувствительным сенсором и кончиком иглы кантилевера АСМ. При сканировании исследуемой поверхности объекта 7 поддерживается постоянный зазор между островом 54 транзистора и объектом 7 и одновременно регистрируется электрический сигнал в виде тока  $I_t$  через транзистор. Этот сигнал отражает потенциальный (зарядовый) профиль исследуемой поверхности, что дает возможность осуществить картирование одиночных зарядов на исследуемой поверхности с высоким пространственным разрешением, пропорциональным размеру острова 54.

При проведении измерений на электроды 51, 52 подаются напряжения смещения  $+V_b/2$  и  $-V_b/2$ . Величина  $V_b$  выбирается близкой к напряжению Кулоновской блокады  $V_t$ , которое определяется по предварительно измеренной вольтамперной характеристике транзистора (фиг.5) и составляет величину от 2-3 мВ для транзистора с рабочей температурой 4 К и до 150-200 мВ для транзистора с комнатной рабочей температурой. При зафиксированном напряжении  $V_b$  на электрод 53 подается напряжение  $V_g$ , его величина определяется из измеренной зависимости величины транспортного тока  $I_t$  от напряжения  $V_g$  на затворе (фиг.6). Зависимость  $I_t(V_g)$  - периодическая, с периодом в один электрон по наведенному на остров заряду  $Q_g$ , а по напряжению  $V_g$  - от долей до единиц Вольт в зависимости от величины емкости между электродом 53 и островом транзистора. Рабочую точку на кривой  $I_t(V_g)$  выбирают на склоне периодической зависимости с максимальной крутизной, что определяет величину  $V_g$ . Изменение регистрируемого сигнала  $I_t$  зависит от потенциала (заряда) области на поверхности исследуемого объекта 7, к которому на расстояние  $R$  приближается остров 54 транзистора. Величина  $R$  может находиться в пределах 0-50 нм и определяется режимом работы АСМ.

В случае использования патентуемого зонда в качестве локального сенсора для исследования локальных объектов (квантовых точек, зарядовых ловушек и т.п.) приближение острова транзистора к исследуемому объекту может производиться под визуальным контролем, например, с помощью электронного микроскопа. В этом случае величина  $R$  - произвольна и определяется свойствами объекта.

Зарядовая чувствительность при измерении реального объекта определяется размером острова транзистора и расстоянием до объекта: при минимальном расстоянии до объекта (порядка размера острова) она может приближаться к собственной зарядовой чувствительности одноэлектронного транзистора -  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  e/Hz<sup>-1/2</sup>. В случае необходимости удаления от объекта она уменьшается как  $1/R^2$ .

Таким образом, патентуемое устройство способно обеспечить пространственную разрешающую способность от единиц до десятков нанометров, определяемую размером острова одноэлектронного транзистора, и высокую зарядовую чувствительность - на уровне  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  e/Hz<sup>-1/2</sup>.

Поскольку размер острова 54 может составлять менее 10 нм, устройство может работать при комнатной температуре, что резко упрощает реализацию сканирующего зондового микроскопа. Патентуемое устройство может быть использовано в зондовых микроскопах множественного типа и в сканирующей потенциальной микроскопии.

Промышленная применимость. Устройство может быть реализовано с использованием известных материалов, методов и оборудования нано- и микроэлектроники и включать следующие приемы:

- легирование верхнего слоя 2 кремния пластин КНИ при помощи ионной

имплантации до концентрации  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$  с последующим отжигом для рекристаллизации кремниевого слоя;

- электронную литографию топологии транзистора;
- формирование металлической маски структуры транзистора напылением тонкой пленки алюминия;
- формирование структуры транзистора в слое кремния при помощи технологии анизотропного и изотропного реактивного ионного травления.

#### Формула изобретения

1. Зонд для сканирующего зондового микроскопа, включающий размещенный на острие кантилевера зарядовый сенсор в виде транзистора, выполненного в слое кремния структуры кремний-на-изоляторе на подложке,

отличающийся тем, что зарядовый сенсор образован в слое кремния, допированном примесью до состояния вырождения и представляет собой одноэлектронный транзистор, имеющий

два подводящих электрода, размещенных под острым углом друг к другу в плоскости подложки, сходящиеся концы которых контактируют с проводящим островом транзистора и выполняют функции истока и стока, и

средний электрод заостренной формы, размещенный в зоне схождения подводящих электродов, острие которого направлено в сторону проводящего острова с образованием емкостного зазора с последним, выполняющий функции затвора транзистора, при этом

перемычки в зоне контакта концов подводящих электродов с островом транзистора выполнены резистивными с возможностью образования туннельного перехода, ребро подложки скошено, а остров транзистора, перемычки и примыкающие к скосу оконечные части подводящих и среднего электродов выступают за пределы слоя изолятора.

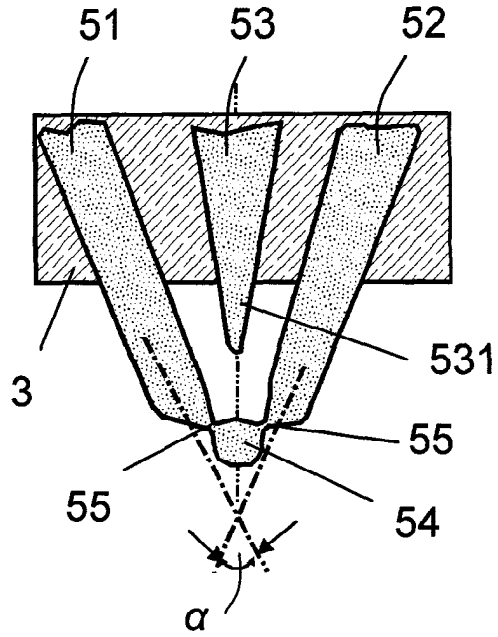
2. Зонд по п.1, отличающийся тем, что угол между подводящими электродами лежит в диапазоне  $20^\circ$ - $160^\circ$ , преимущественно  $90^\circ$ .

3. Зонд по п.1, отличающийся тем, что слой кремния допирован примесями до концентрации, превышающей  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , а его толщина составляет 5-50 нм.

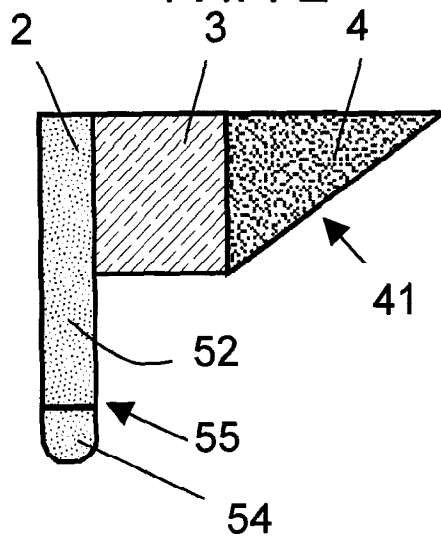
4. Зонд по п.1, отличающийся тем, что линейный размер острова транзистора лежит в диапазоне 5-50 нм.

5. Зонд по п.1, отличающийся тем, что транзистор и балка кантилевера с острием выполнены за одно целое из пластины кремния-на-изоляторе методами электронной литографии, реактивно-ионного и жидкостного травления.

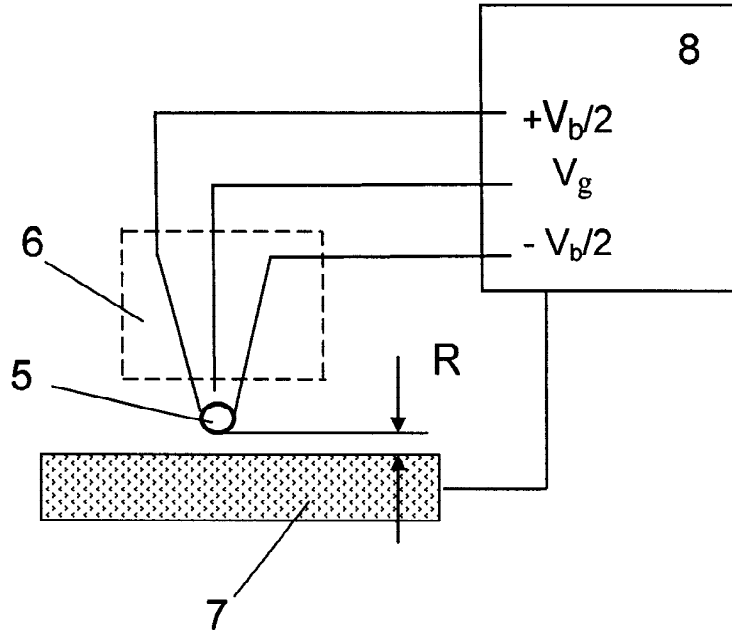




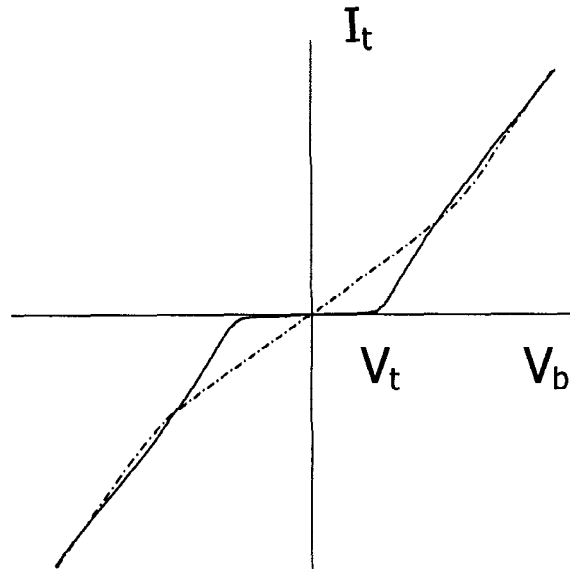
ФИГ. 2



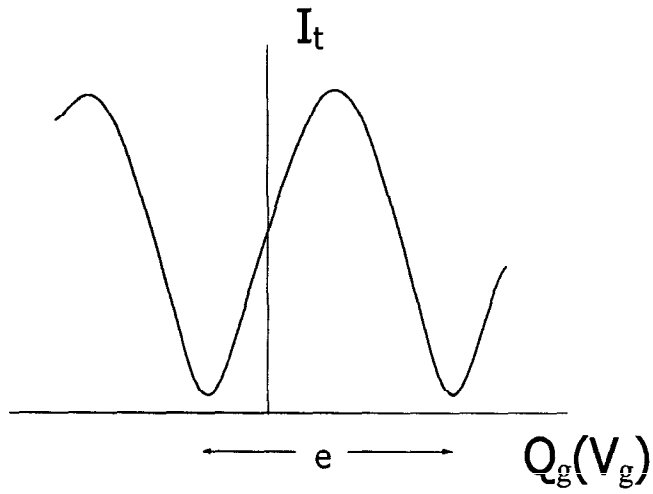
ФИГ. 3



ФИГ. 4



ФИГ. 5



ФИГ. 6