

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2511669

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012146825

Приоритет изобретения **02 ноября 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **07 февраля 2014 г.**

Срок действия патента истекает **02 ноября 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012146825/28, 02.11.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.11.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 02.11.2012

(45) Опубликовано: 10.04.2014 Бюл. № 10

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков и др., Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы, Известия ВУЗов "Радиофизика", Т. XLVIII, N 10-11, 2005, стр. 947-954. RU 2179101 C2, 10.02.2002. US 4958762 A1, 25.09.1990. Силин Л.Л., Баландин Г.Ф., Коган М.Г., Ультразвуковая сварка, М., 1962

Адрес для переписки:

125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7, ИРЭ
им. В.А. Котельникова РАН

(72) Автор(ы):

Кошелец Валерий Павлович (RU),
Кинев Николай Вадимович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

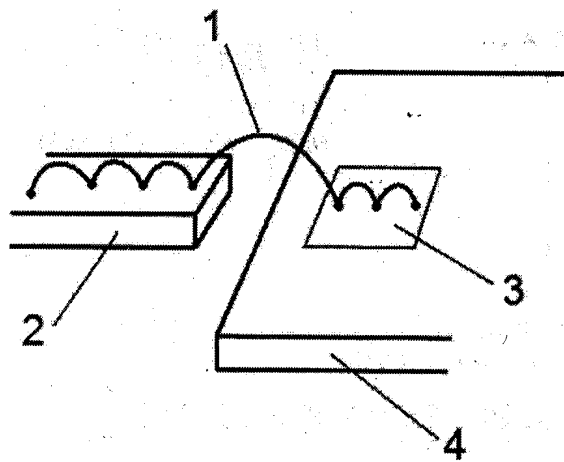
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (RU)

(54) ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области разработки новых элементов и устройств сверхпроводниковой электроники и создания на их основе сверхчувствительных приемных устройств с высоким спектральным разрешением и может быть использовано при создании бортовых и наземных систем, предназначенных для радиоастрономии и мониторинга атмосферы Земли, а также медицинских исследований и систем безопасности. Сущность изобретения заключается в том, что в сверхпроводниковом интегральном приемнике электрические контакты между рабочими элементами микросхемы и

печатной платой смещения, служащей для задания токов управления приемником, выполнены из проволоки в виде точечных контактов, при этом единичной проволокой осуществляется сразу несколько (более 1) последовательных контактных точек. Технический результат - понижение тепловыделения в системе, устранение необходимости дополнительной настройки рабочего режима сверхпроводникового приемника, включающего в себя ряд рабочих параметров, улучшение приемных и спектральных характеристик устройства. 2 з.п. ф-лы, 7 ил.



Фиг. 6

Изобретение относится к области разработки новых элементов и устройств сверхпроводниковой электроники и создания на их основе сверхчувствительных приемных устройств с высоким спектральным разрешением; это изобретение может быть использовано при создании бортовых и наземных систем, предназначенных для радиоастрономии и мониторинга атмосферы Земли, а также медицинских исследований и систем безопасности.

Известным аналогом предлагаемого технического решения являются электрические контакты устройства на основе полупроводников или сверхпроводников между интегральной схемой (интегральным контуром, микросхемой) и печатной платой (платой задания смещения, внешним источником тока, напряжения), выполненные посредством ультразвуковой сварки проволокой [1-3]. Ультразвуковая сварка осуществляется сближением атомов свариваемых металлических поверхностей на расстояние действия межатомных сил за счет энергии ультразвуковых колебаний, вводимых в материалы. Такие контакты используются для соединения деталей, нагрев которых затруднен, а также при соединении разнородных металлов или металлов с прочными окисными пленками, поэтому они нашли широкое применение в производстве интегральных микросхем. Примеры осуществления электрического контакта при помощи ультразвуковой сварки проволокой показаны на фиг. 1а, б, а микрофотография высокого разрешения области ультразвуковой сварки представлена на фиг. 2. При ультразвуковой сварке обычно используется проволока из алюминия с малыми примесями (до 1%) кремния или других элементов, толщина проволоки составляет от 15 до 200 мкм.

Известен патент США «Ультразвуковое сварочное проволокой устройство» (Ultrasonic wire bonder) 1990 года [4]. Данный патент описывает комплексную машину по обеспечению контактов ультразвуковой сваркой при помощи проволоки, а также методику осуществления контактов.

Для подавляющего большинства аналогов предлагаемого технического решения, использующегося в полупроводниковых приборах с рабочими температурами порядка комнатной (300 К) либо жидкого азота ($T=77$ К), совершенно несущественным является контактное сопротивление между проволокой и поверхностью ультразвукового приваривания (контактной площадкой устройства). Однако для низкотемпературных сверхпроводниковых устройств, работающих при температурах порядка жидкого гелия ($T=4,2$ К и ниже), контактное сопротивление неизбежно приводит к тепловыделению в системе при пропускании тока через электрическую схему, что способно заметно влиять на температурный режим криогенной системы. Так, например, при контактном сопротивлении между проволокой и микросхемой $R_k=0,02$ Ом и пропускании через контур тока величин $I=50$ мА, помимо всего прочего в системе выделяется дополнительное тепло $P_{\text{heat}}=I^2 \cdot R_k=50$ мВт. Это может приводить к увеличению температуры в системе на десятые доли К, что заметно влияет на рабочие характеристики сверхпроводниковых элементов. К примеру, вольт-амперная характеристика (ВАХ) перехода на основе туннельной структуры сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС-перехода) значительно зависит от температуры [5]: с ростом температуры происходит ухудшение параметра качества перехода R_j/R_n и уменьшение щелевого напряжения $V_{\text{щ}}$, поэтому чувствительность детектора на основе СИС-смесителя заметно ухудшается при нагреве системы, а также увеличивается ширина линии генерации сверхпроводникового генератора гетеродина на основе распределенного СИС-перехода [6-8]. Следует отметить, что для большинства низкотемпературных устройств очень

важным является не только абсолютное значение температуры, но и ее стабильность. При сильных колебаниях температуры в системе или перегреве работа всего устройства становится невозможной.

Прототипом предлагаемого технического решения является конструкция электрических контактов для сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) терагерцового (ТГц) диапазона [9], совмещающего на одной микросхеме все необходимые элементы гетеродинного приемника: приемную планарную антенну, смеситель на основе двух туннельных СИС-переходов площадью площадью 0,8 мкм каждый, сверхпроводниковый генератор гетеродина на основе распределенного туннельного СИС-перехода, а также гармонический СИС-смеситель площадью 1 мкм², использующийся в системе фазовой автоподстройки частоты для стабилизации гетеродина и синхронизации его мощности. При подаче постоянного питания от батарей микросхема такого приемника работает как супергетеродинный приемник в ТГц частотном диапазоне, не требуя дополнительного СВЧ оборудования. Приемник предназначен для исследования распределения в атмосфере различных соединений и работает в режиме лимбового зондирования с борта высотного аэростата, на сегодняшний день он испытан в рамках проекта TELIS [10]. Перспективными практическими применениями приемника являются также такие области, как медицинские исследования и безопасность.

Фотография микросхемы приемника для измерения спектрального распределения внешнего электромагнитного сигнала показана на фиг.3. Для успешного функционирования как СИС-смесителя, так и гетеродина спроектированы линии управления магнитным полем через переход. Обеспечение электрических контактов между рабочими элементами приемника, расположенными на микросхеме, и печатной платой осуществляется в виде проволочных контактов ультразвуковой сваркой (фиг.4), толщина алюминиевых проволок равняется 25 мкм. Рабочая температура приемника составляет порядка 4,2 К.

Энергетическая щель сверхпроводника, а следовательно, и щелевое напряжение СИС-перехода обратным образом зависят от температуры [5, 11]. При пропускании рабочих токов через любой элемент СИП, а также через линию управления магнитным полем происходит видимое уменьшение щелевого напряжения на величины порядка нескольких мкВ. Так, например, при изменении рабочей частоты приемника зачастую необходимо существенное изменение тока через линию управления магнитным полем, после чего требуется время порядка 2-3 минут для стабилизации формы ВАХ (т.е. всего рабочего режима), что неприемлемо для работы СИП на борту аэростата с учетом его удаленного управления. Динамика изменения во времени щелевого напряжения при включении тока через линию управления магнитным полем гетеродина и тока смещения гетеродина показана на фиг.5, стрелкой на графике обозначен момент включения токов, а величина шума говорит о том, что погрешность измерения напряжения составляет доли мкВ. При изменении формы ВАХ меняются и параметры рабочей точки на ВАХ, при этом происходит изменение частоты генерации гетеродина, пропорциональной напряжению (в соответствии с соотношением Джозефсона [12-13]). Это говорит об ощутимом тепловыделении в системе вследствие лишь пропускания рабочего тока через любой рабочий элемент, именно поэтому вопрос о тепловыделении представляется актуальным.

Поскольку линия управления магнитным полем является пленкой из сверхпроводника и не имеет сопротивления, тепловыделение вследствие пропускания тока через линию вызвано падением напряжения либо на проволоке вблизи микросхемы, либо на

контактном сопротивлении «провода-площадка». Непосредственное измерение тепловыделения, вносимого проволоками, а также измерение контактного сопротивления при данной конструкции не представляется возможным. Это потребовало бы интегрирования в систему дополнительной комплексной системы, имеющей, в свою очередь, собственные контактные подводы, сопротивление которых снова представлялось бы невозможным учесть. Объективным и наиболее чувствительным параметром температуры системы, а значит, и индикатором выделяемой мощности является щелевое напряжение СИС-перехода. Таким образом, определение сопротивления, вносимого проволоками, осуществляется косвенным методом посредством измерения уменьшения щелевого напряжения.

Была проведена серия экспериментов по измерению и оценке сопротивления, вносимого в каналы управления токами проволоками, обеспечивающими контакт. Сопротивление, вносимое единичной проволокой длиной порядка 1 мм, оказалось равным примерно 0,15-0,2 Ом. Чтобы определить, какой вклад в это сопротивление вносит контактное сопротивление, было проведено независимое измерение сопротивления проволоки, помещенной в жидкий гелий. Сопротивление образца проволоки идентичной длины (1 мм) оказалось равным 0,01 Ом, что составляет порядка 5% от общего вносимого сопротивления. Таким образом, было установлено, что более 90% вклада в тепловыделение вносит контактное сопротивление между проволокой и контактными площадками микросхемы приемника. Поэтому основным требованием к обеспечению контактов посредством ультразвуковой сварки проволоками является минимизация контактного сопротивления.

Цель предлагаемого изобретения заключается в существенном понижении тепловыделения в системе вследствие уменьшения контактного сопротивления между проволоками и элементами микросхемы приемника, неизбежно вносимого в систему при ультразвуковой сварке, путем увеличения площади контакта. Это позволяет избежать дополнительной подстройки рабочего режима элементов интегрального приемника в связи с повышением температуры, а также улучшает приемные, спектральные характеристики прибора и его стабильность. Более того, предложенный подход существенно уменьшает время установления рабочего режима при перестройке частоты генератора.

Поставленная цель достигается тем, что в сверхпроводниковом интегральном приемнике электрические контакты между рабочими элементами микросхемы и печатной платой смещения, служащей для задания токов управления приемником, выполнены из проволоки в виде точечных контактов, при этом единичной проволокой осуществляется сразу несколько (более 1) последовательных контактных точек. Схематично техническое решение изображено на фиг.6, оно применимо и к контактными площадкам микросхемы, и к контактными площадкам печатной платы, причем как отдельно, так и совместно. При таком решении естественным путем увеличивается площадь контакта, что приводит к значительному снижению влияния контактного сопротивления и, следовательно, значительно меньшему его вкладу в тепловыделение в криогенной системе. При этом дополнительная длина петли не вносит существенного вклада в общее сопротивление, поскольку сопротивление проволоки составляет заведомо менее 10% от общего сопротивления.

Микросхема приемника устанавливается в специальном криогенном блоке, который обеспечивает охлаждение микросхемы вместе с окружающими ее элементами и крепление печатной платы с фильтрами. По этой плате передаются радиочастотные сигналы от микросхемы и задаются токи питания элементов микросхемы. Фотография криогенного

блока сверхпроводникового интегрального приемника в разобранном виде показана на фиг.7.

Принципиально новым в представленном техническом решении по сравнению с известным является то, что при использовании такой конструкции осуществления контактов ультразвуковой сваркой вследствие значительного снижения тепловыделения в системе устранена необходимость дополнительной настройки рабочего режима сверхпроводникового приемника, включающего в себя ряд рабочих параметров. Кроме того, улучшаются приемные и спектральные характеристики устройства.

Перечень фигур

Фиг.1. а) Пример осуществления контакта ультразвуковой сваркой между алюминиевой проволокой и контактной площадкой транзистора KSY34; б) пример осуществления контакта ультразвуковой сваркой при помощи проволоки для трех электрических контуров.

Фиг.2. Микрофотография контакта, установленного ультразвуковой сваркой, полученная при помощи сканирующего микроскопа.

Фиг.3. Микрофотография микросхемы интегрального приемника, включающая в себя все рабочие элементы гетеродинного приемника, контактные площадки которых обозначены фигурными скобками: 1 - генератора гетеродина, 2 - гармонического смесителя, 3 - СИС-смесителя.

Фиг.4. Микрофотография микросхемы сверхпроводникового интегрального приемника (1), позолоченные контактные площадки которой (2) соединены с медными площадками (3) печатной платы задания смещения (4) при помощи алюминиевых проволок (5).

Фиг.5. График изменения целевого напряжения СИС-смесителя во времени при задании некоторых значений токов в момент, обозначенный стрелкой:

- 1 - ток линии управления магнитным полем гетеродина 60 мА;
- 2 - ток смещения гетеродина 60 мА;
- 3 - ток линии управления магнитным полем гетеродина 90 мА;
- 4 - ток смещения гетеродина 90 мА.

Фиг.6. Схема электрического контакта в виде множества контактных точек с использованием одной проволоки. 1 - проволока, 2 - контактная площадка печатной платы смещения, 3 - контактная площадка микросхемы приемника, 4 - микросхема приемника.

Фиг.7. Фотография криогенного блока (1) с магнитным экраном (2), платы смещения (3) и микросхемы СИП, установленного на кремниевую линзу (4).

Предлагаемое устройство представляет собой конструкцию электрических контактов в составе интегральной системы, работающей как сверхчувствительное приемное устройство ТГц диапазона, которая включает в себя не только ключевые элементы гетеродинного приемника, но также все дополнительные элементы для их согласования, соединения с платами задания токов и напряжений и источниками питания, для их крепления в комплексной криогенной системе, а также для чтения и обработки полученных сигналов. Микросхема предлагаемого устройства изображена на фиг.3, а принципиальная схема установления контактов между элементами приемника и печатной платой задания смещения показана на фиг.6.

Шумовая температура интегрального приемника определялась из отношения сигнала на выходе приемника (Y-фактор), измеренного в режиме переключения горячей и холодной нагрузок. Лучшее значение температуры составляет порядка 120 К на частотах около 610 ГГц и 500 ГГц. Величина шумовой температуры приемника практически не

зависит от тока смещения гетеродина, что дает возможность в некотором диапазоне изменять этот ток в поисках рабочей точки с минимальной шириной линии генерации.

Для спектральных измерений важно, чтобы шумовая температура приемника была равномерна во всем диапазоне промежуточной частоты (ПЧ). Для этих целей были разработаны и включены в конструкцию микросхемы приемника элементы, согласующие СИС-смеситель с трактом ПЧ в широкой полосе. Непосредственно на микросхеме размещены отстроечные емкости, которые, будучи расположенными до проволочного соединения ультразвуковой сваркой, закорачивают на землю по переменному току отрезок копланарной линии, играющей роль отстраивающей индуктивности, включенной параллельно паразитной емкости СИС-смесителя и его согласующим структурам терагерцового диапазона. Это наряду с разделением копланарной линии на две секции позволило увеличить ширину полосы ПЧ-тракта до 4 ГГц и добиться хорошей равномерности амплитудно-частотной характеристики тракта в диапазоне 4-8 ГГц.

Линия генерации сверхпроводникового генератора гетеродина с высокой степенью точности имеет лоренцеву форму [6-9]. Частота генерации однозначно связана с напряжением на генераторе при помощи соотношения Джозефсона. В автономном режиме стабильность генератора определяется низкочастотными наводками и медленными дрейфами в системе питания, а в режиме частотной стабилизации данные отклонения компенсируются за счет цепи обратной связи.

Мы провели цикл измерений для определения эффективного вклада системы проволок в сопротивление каналов управления током при использовании предлагаемой методики установления множества контактных точек одной проволокой ультразвуковой сваркой, в экспериментальном образце количество точек составляло 3. Вычисление значения вклада единичной проволоки дало результат в 0,05 Ом, что в 3-4 раза меньше по сравнению с сопротивлением, полученным при использовании стандартной методики. Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет понизить тепловыделение в криогенной системе более чем в 3 раза, что позволяет избежать дополнительной подстройки рабочего режима элементов интегрального приемника в связи с повышением температуры, а также улучшает приемные, спектральные характеристики прибора и его стабильность. Время установления рабочего режима при перестройке частоты не превышает 30 секунд.

Источники информации

1. Силин Л.Л., Баландин Г.Ф., Коган М.Г. Ультразвуковая сварка. М., 1962.
2. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 3. М., 1970.
3. Ультразвуковая технология. Ред. Б.А.Аграната. М., 1974.
4. United States Patent №4958762. Shimizu et al. Ultrasonic wire bonder. 25.09.1990.
5. Лихарев К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука. 1985.
6. V.P.Koshelets, S.V.Shitov, A.V.Shchukin et al. // Appl. Phys. Lett., Vol.69, №5, p.699-701. 1996.
7. V.P.Koshelets, S.V.Shitov, A.V.Shchukin et al. // IEEE Trans, on Appl. Supercond. 7, p.3589-3592. 1997.
8. V.P.Koshelets, S.V.Shitov, L.V.Filippenko et.al. // IEEE Trans, on Appl. Supercond. 7, p.2905-2908. 1997.
9. В.П.Кошелец, П.Н.Дмитриев, А.Б.Ермаков et al. // Известия ВУЗов "Радиофизика", Том XLVШ, №10-11, стр.947-954. 2005.
10. Gert de Lange, Dick Boersma, Johannes Dercksen et al. // Supercond. Sci. Technol. Vol.23. P. 045016. 2010.
11. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: МЦНМО. 2000.

12. B.D.Josephson // Phys. Lett. 1, 251. 1962.

13. D.N.Langenberg et. al. // Phys. Rev. Lett. 15, 294. 1965.

Формула изобретения

5 1. Электрические контакты для сверхпроводникового интегрального приемника, выполненные из проволоки, соединяющей посредством ультразвуковой сварки рабочие элементы сверхпроводникового интегрального приемника с печатной платой смещения для задания токов управления приемником, отличающиеся тем, что количество контактных точек единичной проволокой на контактных площадках по крайней мере

10 одного из элементов - микросхемы либо платы задания смещения - превышает 1.

2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что количество контактных точек единичной проволокой на контактных площадках микросхемы и контактных площадках печатной платы смещения превышает 1.

15 3. Устройство по п.2, отличающееся тем, что количество контактных точек единичной проволокой на контактных площадках микросхемы и контактных площадках печатной платы смещения выбрано равным 3.

20

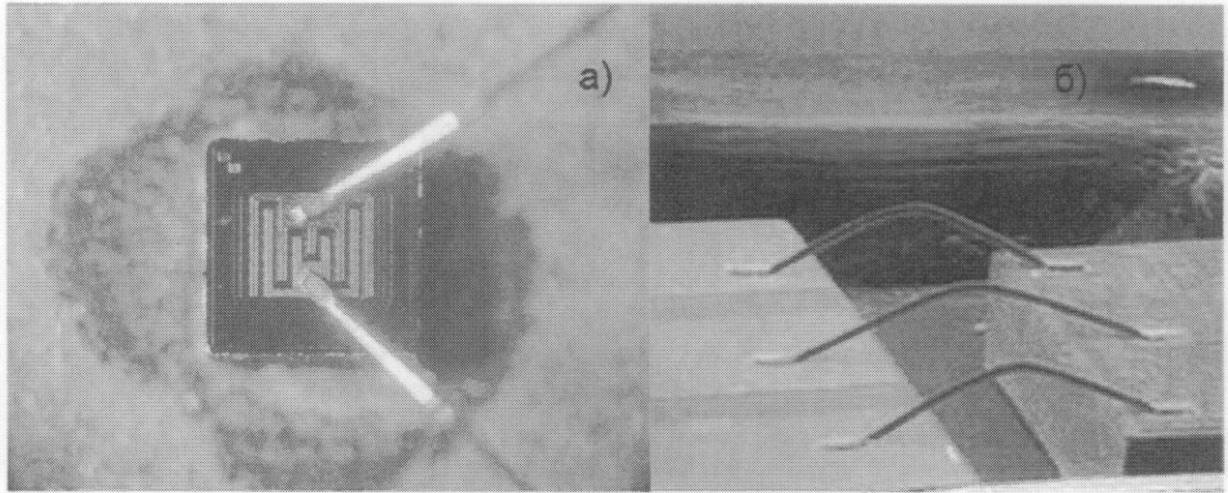
25

30

35

40

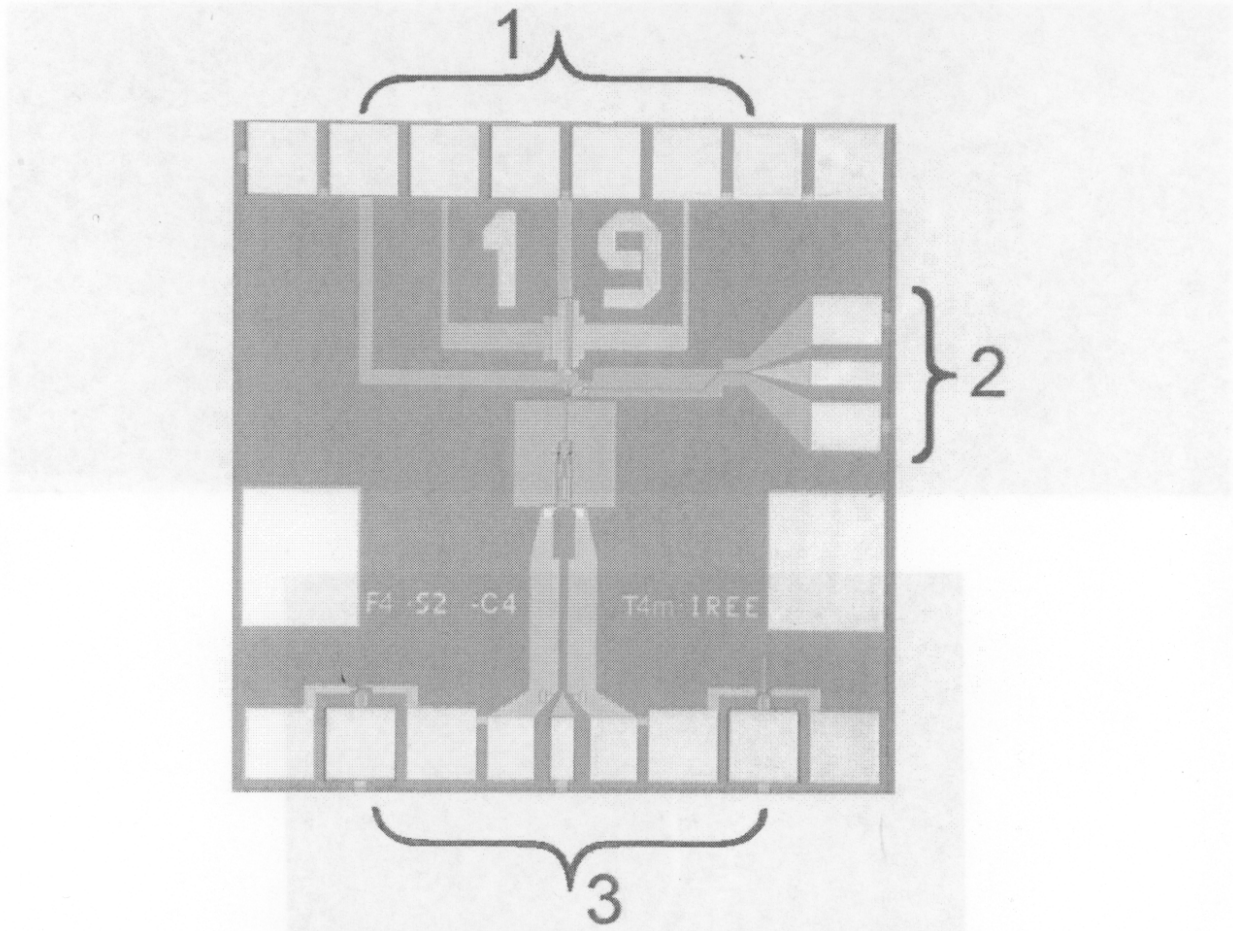
45



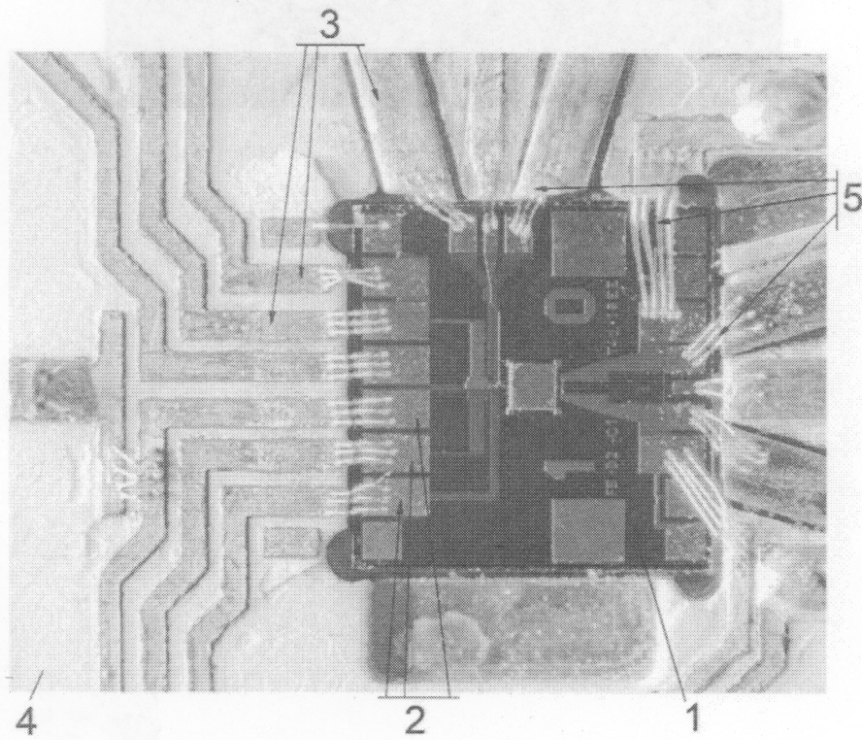
Фиг. 1



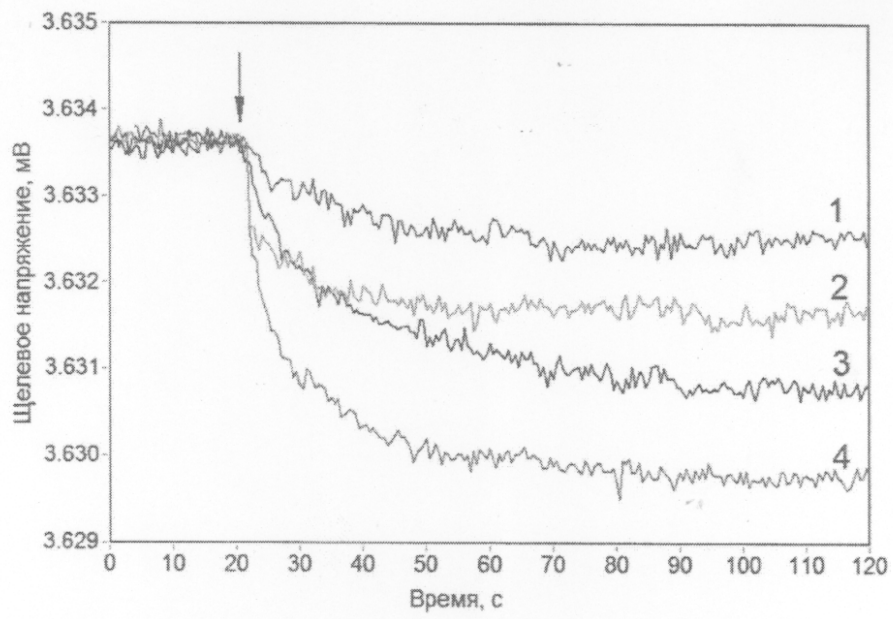
Фиг. 2



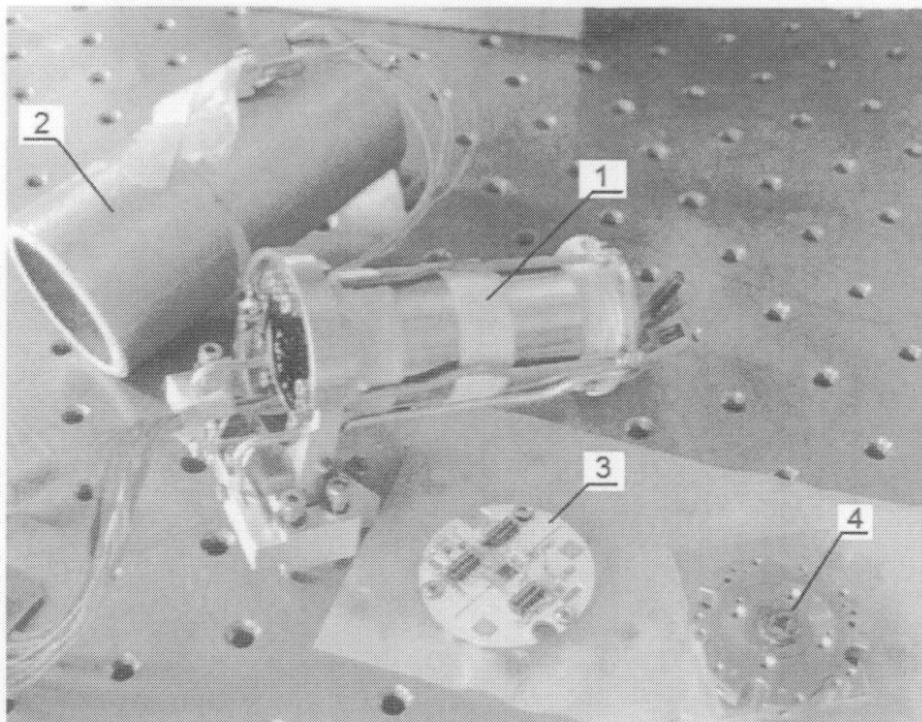
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 7