

H 01 L 29/08

H 01 L 21/70

H 01 L 39/10

H01L39/22

Способ изготовления устройств со свободно висящими микромостиками

Изобретение относится к области тонкопленочной микроэлектроники, в частности, к изготовлению высокочувствительных болометров, электронных охладителей, одноэлектронных транзисторов, содержащих свободно висящий микромостик нормального металла и сверхпроводниковые переходы типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН), сверхпроводник-изолятор-другой сверхпроводник (СИС'), а также андреевские контакты (сверхпроводник-андреевский контакт-нормальный металл) и структуры с барьером Шоттки (сверхпроводник-барьер Шоттки-полупроводник).

Известен способ-аналог: изготовление интегрального чувствительного болометра, в котором свободно висящий микромостик из аморфного кремния формируют посредством травления слоя окисла, нанесенного под ним [1]. По этому способу на кремниевой оксидированной подложке сначала фотолитографией и травлением формируют полосу окисла, фотолитографией и травлением формируют первый слой аморфного кремния, фотолитографией и травлением формируют второй слой аморфного кремния, легируют его, и травлением формируют верхний слой с отверстиями для травления первого слоя окисла. В результате получают тонкий висящий мостик легированного аморфного кремния с необходимым температурным коэффициентом сопротивления. Недостатком аналога является необходимость проведения трех операций фотолитографии, трех различных напылений, четырех операций травления. Три вакуумных цикла с последующим воздействием атмосферы и химикатов фотолитографии в промежутке приводит к возникновению паразитных контактных сопротивлений, снижению качества структур, ухудшению воспроизводимости устройств.

Известны способы-аналоги: в которых свободно висящие полупроводниковые мостики формируются разными модификациями по способу-аналогу [1]. В патенте [2] технология модифицирована для более толстых пленок изолятора и большей высоты подвеса. В патенте [3] приводится модификация для использования поддерживающего слоя из нитрида кремния, что позволяет использовать более тонкие пленки резистивного мостика. В патенте [4] описан спектрометр с использованием таких мостиков в виде

матрицы пикселей на подложке из полиимида (майлара). В патенте [5] описана конструкция дифференциального детектора с использованием пар висящих мостиков на полиимидной основе для устранения влияния дрейфов и созданий частотно-селективных приемников. В патенте [6] описана конструкция с поддержкой таких висящих мостиков с помощью микростолбиков. В патенте [7] предлагается выбирать толщину подвеса, равную четверти длины волны и формировать схему считывания на той же подложке.

Известен способ-аналог: изготовление свободно висящего в воздухе мостика, в котором мостик размещен над подложкой поверх предварительно засвеченного резиста [8]. Используются трехслойный резист, в котором средний слой полностью засвечивается. При контактной литографии форма мостика определяется верхним и нижним слоями резиста. Электрические контакты толщиной 100 нм напыляют под прямым углом, а висмутовый мостик напыляется под углами 50° с каждой стороны от мостика. Таким образом, 100 нм висмута наносится под мостиком из резиста и поддерживается над подложкой нижним слоем резиста. После напыления подложку помещают в ацетон для растворения фоторезиста. Нежелательный металл сверху резиста удаляется и остается подвешенный на концах болометр, а под ним резист также оказывается удаленным. Такая технология отличается сложностью процессов засветки и проявления резиста, слабой воспроизводимостью и низким качеством пленок, напыляемых поверх трехслойного фоторезиста.

Известен способ-аналог: изготовление болометров с подвешенными резистивными элементами, термически связанными с туннельными подвешенными СИС переходами [9]. Структуры формируются поверх слоя оксида кремния, а сама кремниевая подложка под ним вытравливается в плазме CF_6 . Недостатком этого метода является наличие подслоя оксида кремния, что увеличивает тепловой контакт с подложкой и снижает предельные характеристики по сравнению с полностью подвешенными металлическими мостиками.

Известен способ-аналог: изготовление висящего алюминиевого одноэлектронного транзистора [10]. В этом случае первоначально формируется пьедестал высотой 50 нм из органического полимера каликсарена, который затем может быть вытравлен в плазме кислорода после формирования одноэлектронного транзистора. Недостатком метода является нанесение пленок мостика и переходов поверх этого органического полимера, что снижает качество пленок и точность изготовления структур.

Известен способ-прототип: технологии изготовления подвешенных медных мостов электронных охладителей методом химического травления [11]. На оксидированную подложку наносят многослойную структуру Al/AlOx/Cu и делают первую фотолитографию для формирования общей топологии устройства. Центральная часть структуры содержит линию отверстий диаметром 2 мкм с зазором 2 мкм между ними. Пленка меди в открытых областях резиста химически вытравливается ионным травлением, либо химическим травлением в разбавленной азотной кислоте. После этого проводится травление алюминия через ту же маску резиста в растворе слабой щелочи, конкретно в разбавленном проявителе. В результате образуется непрерывный зазор в алюминиевой пленке и свободно висящий медный мостик. Область СИН переходов формируется второй литографией, травление разрывов в медной пленке позволяет изолировать медный островок от алюминиевых электродов, в результате образуется структура типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (СИНИ). Недостатками метода-прототипа является необходимость использования травлений одной структуры в двух травителях (кислотном и щелочном) и необходимость проведения второй фотолитографии для формирования геометрии СИН переходов.

Для формирования свободно висящих мостиков по способу-прототипу:

1. -наносит без разрыва вакуума на всю подложку многослойную структуру, состоящую из нижнего слоя алюминия, который затем окисляют для формирования туннельного барьера, и верхнего слоя меди в качестве нормального металла.
2. проводят первую фотолитографию: наносят слой фоторезиста, запекают его, проводят экспозицию всей структуры, проявляют резист.
3. –селективно химически стравливают в кислоте слой меди в открытых областях
4. – селективно химически стравливают в щелочи алюминий как в открытых от резиста областях, так и с контролируемым подтравом с торцов для удаления алюминия под расположением будущего мостика.
5. –проводят второй цикл фотолитографии для формирования окон в резисте, которые будут служить границей туннельных переходов
6. Проводят селективное химическое травление меди в кислоте в открытых окнах для изоляции медного мостика с переходами от остальной многослойной структуры.

7. Формируют соединительные проводники к верхнему электроду в третьем слое литографии с нанесением пленки проводников и ее удалением вне экспонированной области методом взрыва (обратная литография).

Технология создания высококачественных туннельных переходов и термически изолированных от подложки островков требуется для одноэлектронных устройств, для электронных охладителей структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН), СИНИС болометров на холодных электронах, использующих прямое электронное охлаждение абсорбера. Для применений, использующих электронное охлаждение, требуются переходы относительно большой площади, тогда как классическая технология теневого напыления ограничена площадью перехода менее 1 мкм^2 , что определяется перехлестом напыляемых пленок, расположенных под подвешенным мостиком из фоторезиста. Также для болометров и охладителей требуется наносить слой нормального металла малой толщины, что противоречит требованию увеличения толщины последующих слоев для классической планарной технологии с целью избегания разрывов пленок последующих слоев.

Перечисленные приложения в случае серийного промышленного производства требуют применения современных методов магнетронного напыления и оптической литографии для снятия ограничения по площади, устранения паразитных теней, сохранения высокого качества туннельного барьера. Применение модифицированных методов теневого термического напыления в способе-аналоге [8], не позволяет получить высокой степени воспроизводимости структур, а сам метод не является технологичным для серийного производства.

Недостатком прототипа является необходимость проведения трех операций фотолитографии, трех различных напылений, четырех операций травления. Три вакуумных цикла с последующим воздействием атмосферы и химикатов фотолитографии в промежутке приводит к возникновению паразитных контактных сопротивлений, снижению качества структур, ухудшению воспроизводимости устройств.

Целью предлагаемого изобретения является: упрощение технологии и повышение воспроизводимости устройств со свободно висящими тонкопленочными микромостиками, формирование произвольной формы высококачественных туннельных переходов, снятие ограничения на форму и площадь переходов, малую толщину верхнего электрода, снятие ограничения на применение одного металла для различных элементов нормального электрода, устранение паразитных закороток на торцах пленок без

дополнительной анодизации структур, устранение ограничения на уменьшение толщины верхнего электрода.

Сущность изобретения поясняется чертежом на Фиг.1, где приведен вид сверху и сечение слоев тонких пленок по линии А-А и по линии В-В:

На верхней части рисунка: предварительно нанесенные соединительные проводники (1), многослойная тонкопленочная структура (2) и окно в резисте для травления под мостиком (3)

Снизу сечение А-А где (4) подложка, (5) пленка алюминия, (6) пленка меди.

Справа сечение по линии В-В, где виден разрыв верхней пленки (6) на краю нижней пленки разводки (1), при этом нижний сверхпроводящий слой (5) остается непрерывным, поскольку выполняется условие, что толщина (5) больше, а толщина (6) меньше, чем толщина пленки (1).

Предлагаемый способ изготовления устройств по **п.1** формулы изобретения с свободно висящим мостиком и туннельными переходами структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН) или сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС), состоящими из двух слоев металла, разделенных туннельным переходом, характеризуется следующей последовательностью операций.

1. Методом обратной литографии из пленки нормального металла формируют на подложке контактные площадки и соединительные проводники (1)
2. –Поверх сформированных соединительных проводников и контактных площадок (1), делают литографию для формирования многослойной структуры.
3. в едином цикле без разрыва вакуума поверх резиста с окнами наносят многослойную структуру (3), состоящую из нижней пленки сверхпроводникового алюминиевого электрода (5), туннельного барьера толщиной 1-1.2 нм, и верхней пленки нормального металла (6), в итоге получают трехслойную структуру сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН).
4. удаляют пленку с резистом вне области окон помещением в ацетон, или ремувер
5. наносят фоторезист и делают фотолитографию для формирования окна (3) для травления алюминия.
6. --проводят проявление резиста в щелочном проявителе с одновременным подтравом алюминия в области под будущим мостиком
7. – удаляют оставшийся резист в ацетоне.

Новым, по сравнению с прототипом, является разрыв верхнего электрода на границе поверх перекрытия с нижней пленкой электрических проводников, существенным признаком является необходимость выполнения условия, что толщина верхнего нормального электрода меньше, а толщина нижнего алюминиевого электрода больше толщины нижней пленки электрических проводников. Это позволяет избавиться от одного цикла фотолитографии. Новым является также один этап травления в слабой щелочи вместо двух травлений, сначала в кислоте, а потом в щелочи, как в прототипе. Отсутствие этапа селективного химического травления верхнего медного электрода позволяет существенно расширить выбор материала верхнего электрода и применять механически более жесткие и более высокоомные материалы как палладий.

Предлагаемый способ изготовления устройств по п.2 формулы изобретения с тонкопленочными сверхпроводниковыми джозефсоновскими переходами структуры сверхпроводник – изолятор- сверхпроводник (СИС'), состоящими из разных сверхпроводящих электродов и туннельного барьера между ними, характеризуется следующей последовательностью операций :

1. Методом обратной литографии формируют на подложке контактные площадки и соединительные проводники (1)
2. –Поверх сформированных соединительных проводников и контактных площадок (1), делают фотолитографию для формирования многослойной структуры.
3. в едином цикле без разрыва вакуума поверх резиста с окнами наносят многослойную структуру (3), состоящую из нижней пленки сверхпроводникового алюминиевого электрода (5), туннельного барьера в виде окисла алюминия и верхней пленки другого сверхпроводника (6), в итоге получают трехслойную структуру сверхпроводник-изолятор-другой сверхпроводник СИС'.
4. удаляют пленку с резистом вне области окон помещением в ацетон, или ремувер
5. наносят фоторезист и делают фотолитографию для формирования окна (3) для травления алюминия.
6. --проводят проявление резиста в щелочном проявителе с одновременным подтравом алюминия в области под будущим мостиком
7. – удаляют оставшийся резист в ацетоне.

Новым, по сравнению с прототипом, является разрыв верхнего сверхпроводящего электрода на границе поверх перекрытия с нижней пленкой электрических проводников, существенным признаком является необходимость выполнения условия, что толщина верхнего сверхпроводящего электрода меньше, а толщина нижнего алюминиевого сверхпроводящего электрода больше толщины нижней пленки электрических проводников. Это позволяет избавиться от одного цикла фотолитографии. Новым является также один этап травления в слабой щелочи вместо двух травлений, сначала в кислоте, а потом в щелочи, как в прототипе. Отсутствие этапа селективного химического травления верхнего медного электрода позволяет существенно расширить выбор материала верхнего электрода и применять более жесткие сверхпроводящие материалы как гафний.

Предлагаемый способ изготовления устройств по **п.3** формулы изобретения с тонкопленочными сверхпроводниковыми андреевскими переходами структуры сверхпроводник - андреевский контакт - нормальный металл (САН), состоящими из сверхпроводящего и нормального металлов с андреевским контактом между ними, характеризуется следующей последовательностью операций :

1. Методом обратной литографии формируют на подложке контактные площадки и соединительные проводники (1)
2. –Поверх сформированных соединительных проводников и контактных площадок (1), делают литографию для формирования многослойной структуры.
3. в едином цикле без разрыва вакуума поверх резиста с окнами наносят многослойную структуру (3), состоящую из нижней пленки сверхпроводникового алюминиевого электрода (5), и непосредственного контакта с верхней пленкой нормального металла (6), в итоге получают трехслойную структуру сверхпроводник-андреевский контакт-нормальный САН.
4. удаляют пленку с резистом вне области окон помещением в ацетон, или ремувер
5. наносят фоторезист и делают фотолитографию для формирования окна (3) для травления алюминия.
6. --проводят проявление резиста в щелочном проявителе с одновременным подтравом алюминия в области под будущим мостиком
7. – удаляют оставшийся резист в ацетоне.

Новым, по сравнению с прототипом, является разрыв верхнего электрода на границе поверх перекрытия с нижней пленкой электрических проводников, существенным признаком является необходимость выполнения условия, что толщина верхнего нормального электрода меньше, а толщина нижнего алюминиевого электрода больше толщины нижней пленки электрических проводников. Это позволяет избавиться от одного цикла фотолитографии. Новым является также один этап травления в слабой щелочи вместо двух травлений, сначала в кислоте, а потом в щелочи, как в прототипе. Отсутствие этапа селективного химического травления верхнего медного электрода позволяет существенно расширить выбор материала верхнего электрода и применять более жесткие и более высокоомные материалы как палладий или гафний.

Предлагаемый способ изготовления устройств по **п.4** формулы изобретения с тонкопленочными сверхпроводниковыми переходами структуры сверхпроводник-полупроводник (супер-Шоттки), состоящими из сверхпроводникового и полупроводникового электродов с барьером Шоттки на границе, характеризуется следующей последовательностью операций:

1. Методом обратной литографии формируют на подложке контактные площадки и соединительные проводники (1) (Фиг. 1)
2. –Поверх сформированных соединительных проводников и контактных площадок (1), делают литографию для формирования многослойной структуры.
3. в едином цикле без разрыва вакуума поверх резиста с окнами наносят многослойную структуру (3), состоящую из нижней пленки сверхпроводникового алюминиевого электрода (5), и верхней пленки полупроводника (6), между которыми образуется барьер Шоттки, в итоге получают трехслойную структуру сверхпроводник-барьер Шоттки-полупроводник (СШП).
4. удаляют пленку с резистом вне области окон помещением в ацетон, или ремувер
5. наносят фоторезист и делают фотолитографию для формирования окна (3) для травления алюминия.
6. --проводят проявление резиста в щелочном проявителе с одновременным подтравом алюминия в области под будущим мостиком
7. – удаляют оставшийся резист в ацетоне.

Новым, по сравнению с прототипом, является разрыв верхнего полупроводникового электрода на границе поверх перекрытия с нижней пленкой электрических проводников, существенным признаком является необходимость выполнения условия, что толщина верхнего полупроводникового электрода меньше, а толщина нижнего алюминиевого электрода больше толщины нижней пленки электрических проводников. Это позволяет избавиться от одного цикла фотолитографии. Новым является также один этап травления в слабой щелочи вместо двух травлений, сначала в кислоте, а потом в щелочи, как в прототипе. Отсутствие этапа селективного химического травления верхнего полупроводникового электрода позволяет расширить выбор материала полупроводникового электрода и применять, помимо кремния, также германий или арсенид галлия.

Физический механизм достижения целей изобретения заключается в использовании процесса обратной (взрывной) литографии вместо двухэтапного химического травления, использования эффекта разрыва пленки на ступеньке поверх нижней пленки контактных проводников, существенным признаком является необходимость выполнения условия, что толщина верхнего полупроводникового электрода меньше, а толщина нижнего алюминиевого электрода больше толщины нижней пленки электрических проводников. В способе-прототипе требуется дополнительная литография для разрыва верхней полупроводниковой пленки, тогда как в предложенном методе такой разрыв автоматически формируется на границе с пленкой разводки. Отсутствие дополнительного этапа селективного травления верхнего слоя позволяет применять произвольные полупроводниковые материалы, поскольку не требуется подбирать специальный селективный химический травитель.

У авторов изобретения имеется положительный опыт изготовления описанных структур по п.1 и п.2 формулы изобретения. Были изготовлены СИНИС структуры с висящими микромостиками из меди, палладия, меди с палладием, гафния толщиной 20 нм, нанесенные на ступеньке из TiAuPd высотой 70 нм. В качестве химического травителя применялся тот же проявитель, что и для проявки фоторезиста. У авторов имеется успешный опыт изготовления переходов с барьером Шоттки, который

формируется на основе окисла титана в переходах титан-оксид титана-алюминий. У авторов имеется успешный опыт изготовления андреевских контактов по приведенной технологии в случае применения трехслойной САН структуры палладий-андреевский контакт-алюминий.

Технический результат предлагаемого решения состоит в достижении поставленных целей: повышении воспроизводимости, снижении трудоемкости и времени изготовления структур, увеличении площади туннельных переходов более 1 мкм^2 при снижении толщины верхнего электрода и перемычки абсорбера менее толщины нижнего электрода, снятии ограничения на форму переходов, устранении паразитных теней, устранении паразитных шунтирующих емкостей и сопротивлений утечки, уменьшении количества технологических ступеней литографии.

Литература

1. United States Patent 5,260,225, Integrated infrared sensitive bolometers, M.Liu, J.Haviland, C.Yue, date Nov. 9, 1993.
2. United States Patent 5,627,112, Method of making suspended microstructures, W.Tennant, I.Gergis, C.Seabury, date May 6, 1997.
3. United States Patent 5,777,328, Ramped foot support, R.Gooch, date Jul. 7, 1998.
4. United States Patent 5,777,329, Bolometer array spectrometer, G.Wectphal, M.Wadsworth, date Jul. 7, 1998.
5. United States Patent 5,841,137, Duplicative detector sensor, J.Whitney, date Nov. 24, 1998.
6. United States Patent 5,962,909, Microstructure suspended by a microsupport, H.Jerominek, M.Renaud, N.Swart, date Oct. 5, 1999.
7. United States Patent 7,262,413 B2, Photoconductive bolometer infrared detector, C.Kauffman, S.S.Yoo, T.Beystum, date Aug. 28, 2007

8. D.Neikirk, D.Rutledge, Air-bridge microbolometer for far-infrared detection, *Appl. Phys. Lett.*, 44 (2), pp. 153-155 (1984).
9. A.Timofeev, P.Helisto, L.Gronberg, A.Luukanen, H.Seppa, J.Hassel, Suspended tunnel junction bolometers for Terahertz range, *The Open Applied Physics Journal*, 2012, 5, 34-40.
10. T.Li, Yu.Pashkin, O.Astafiev, Y.Nakamura, J.Tsai, H.Im, Low-frequency charge noise in suspended aluminum single-electron transistors, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 033107 (2007).
11. H.Nguyen, L.Pascal, Z.Peng, O.Buisson, B.Gilles, C.Winkelmann, H.Courtois, Etching suspended superconducting tunnel junctions from a multilayer, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 252602 (2012); arXiv:1111.3541v2 [cond-mat.supr-con] 23 Jun 2012.

- 1. СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВ СО СВОБОДНО ВИСЯЩИМИ МИКРОМОСТИКАМИ**, состоящий из нанесения без разрыва вакуума трехслойной тонкопленочной структуры; нанесения резиста, экспозиции, проявления; селективного химического травления нижнего электрода трехслойной структуры, **отличающееся тем, что** перед напылением трехслойной структуры типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН) проводят фотолитографию, методом взрыва формируют топологию СИН структуры, и проводят однократное травление в щелочном проявителе, совмещенное с проявлением резиста с рисунком окон, при этом разрыв верхнего электрода образуется на ступеньке на границе подводящих проводников, существенным признаком является необходимость выполнения условия что толщина верхнего нормального электрода меньше, а толщина нижнего алюминиевого электрода больше толщины нижней пленки электрических проводников.
- 2. СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВ СО СВОБОДНО ВИСЯЩИМИ МИКРОМОСТИКАМИ**, состоящий из нанесения без разрыва вакуума трехслойной тонкопленочной структуры; нанесения резиста, экспозиции, проявления; селективного химического травления нижнего электрода трехслойной структуры, **отличающееся тем, что** перед напылением структуры сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) проводят фотолитографию, методом взрыва формируют топологию СИС структуры, и проводят однократное травление в щелочном проявителе, совмещенное с проявлением резиста с рисунком окон, при этом разрыв верхнего сверхпроводящего электрода образуется на ступеньке на границе подводящих проводников, существенным признаком является необходимость выполнения условия что толщина верхнего нормального электрода меньше, а толщина нижнего алюминиевого электрода больше толщины нижней пленки электрических проводников, а также что в качестве верхнего электрода трехслойной структуры применяется другой сверхпроводящий материал по сравнению с нижним алюминиевым электродом (например гафний) чтобы избежать травления верхнего электрода в проявителе.
- 3. СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВ СО СВОБОДНО ВИСЯЩИМИ МИКРОМОСТИКАМИ**, состоящий из нанесения без разрыва вакуума трехслойной тонкопленочной структуры; нанесения резиста, экспозиции, проявления; селективного химического травления нижнего электрода трехслойной структуры,

отличающееся тем, что перед напылением структуры сверхпроводник-андреевский контакт-нормальный металл (САН) проводят фотолитографию, методом взрыва формируют топологию САН структуры, и проводят однократное травление в щелочном проявителе, совмещенное с проявлением резиста с рисунком окон, при этом разрыв верхнего нормального электрода образуется на ступеньке на границе подводящих проводников, существенным признаком является необходимость выполнения условия что толщина верхнего нормального электрода меньше, а толщина нижнего алюминиевого электрода больше толщины нижней пленки электрических проводников.

- 4. СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВ СО СВОБОДНО ВИСЯЩИМИ МИКРОМОСТИКАМИ**, состоящий из нанесения без разрыва вакуума трехслойной тонкопленочной структуры; нанесения резиста, экспозиции, проявления; селективного химического травления нижнего электрода трехслойной структуры, **отличающееся тем, что** перед напылением трехслойной структуры сверхпроводник-барьер Шоттки - полупроводник (СШП) проводят фотолитографию, методом взрыва формируют топологию САН структуры, и проводят однократное травление в щелочном проявителе, совмещенное с проявлением резиста с рисунком окон, при этом разрыв верхнего полупроводникового электрода образуется на ступеньке на границе подводящих проводников, существенным признаком является необходимость выполнения условия что толщина верхнего полупроводникового электрода меньше, а толщина нижнего алюминиевого электрода больше толщины нижней пленки электрических проводников.

Фигура 1.

