

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 18757

(13) С1

(46) 2014.12.30

(51) МПК

H 01C 17/075 (2006.01)

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА

(21) Номер заявки: а 20110172

(22) 2011.02.11

(43) 2012.10.30

(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(72) Авторы: Мозалев Александр Михайлович; Плиговка Андрей Николаевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(56) ВУ 11811 С1, 2009.

ВУ 6613 С1, 2004.

RU 2332741 С1, 2008.

RU 2389973 С2, 2010.

JPS 5935956 А, 1984.

GB 1120638 А, 1968.

(57)

Способ изготовления тонкопленочного резистора, в котором на подложку последовательно наносят резистивную пленку тантала толщиной 22 нм, слой алюминия и защитную пленку тантала заданной толщины $h_{зп}$, формируют маски из указанной защитной пленки по рисунку контактных площадок резистора посредством фотолитографии и травления, затем проводят сквозное пористое электрохимическое анодирование слоя алюминия в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты при температуре 296 К и напряжении формовки 53 В, далее проводят реанодирование резистивной пленки тантала через поры образовавшегося анодного оксида алюминия при анодном напряжении, изменяющемся с заданной постоянной скоростью от нуля до величины E , определяемой в соответствии с математическим выражением:

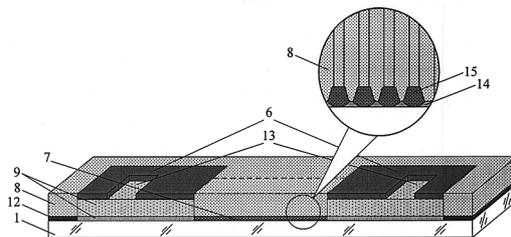
$$E = k(105,73 - 35,36e^{(2,06-pf)} - 28,24e^{(0,04-pf/54,75)}),$$

где k - размерный коэффициент, равный 1 В;

ρ - удельное поверхностное сопротивление готового резистора, выбираемое при его проектировании из интервала от 150 до 11420 Ом/□ с учетом задаваемой толщины защитной пленки тантала, связанной с напряжением E соотношением $h_{зп} > 0,64Ed$;

f - размерный коэффициент, равный 0,6 □/Ом;

d - размерный поправочный коэффициент, равный 1 нм/В,



Фиг. 7

ВУ 18757 С1 2014.12.30

наносят сверху дополнительную пленку тантала, формируют из нее посредством фотолитографии и травления маску по рисунку резистивной области резистора между контактными площадками, а затем термически доокисляют через поры анодного оксида алюминия участки резистивной пленки тантала, не закрытые масками, образованными из защитной и дополнительной пленок, и вскрывают контактные окна готового резистора в масках из термически окисленной защитной пленки тантала.

Изобретение относится к электронной технике и может быть использовано для изготовления резисторов в интегральном и дискретном исполнении.

Известен способ создания тонкопленочного резистора (ТПР) [1], в соответствии с которым методом ионного напыления наносят тонкую пленку тантала, формируют топологию ТПР с помощью фотолитографии и травления и проводят пассивацию пленки тантала с помощью частичного термического окисления. Описанный способ создания ТПР отличается технической простотой, но имеет существенные недостатки. В частности, невозможно сформировать резистивный слой с высоким и стабильным поверхностным сопротивлением (ПС) и низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) из-за малого сопротивления резистивного материала (тантала) и преобладания металлического типа проводимости в танталовых пленках с толщиной, необходимой для воспроизводимого получения номинала ТПР. Подгонки номинала ТПР, получаемого данным способом, не предусмотрено, из-за чего не представляется возможным сформировать прецизионные ТПР. В результате ухудшается качество и снижается процент выхода годных ТПР.

Известен другой способ изготовления ТПР [2]. На диэлектрическую подложку, например ситалловую, методом вакуумного напыления при давлении $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. и температуре подложки 400 К в течение 400 с через металлическую маску напыляют тонкую пленку толщиной 50 нм, состоящую из смеси тантала и оксида тантала. Проводят плотное электрохимическое анодирование в 0,5 %-ном водном растворе азотной кислоты при анодном напряжении, изменяющемся с постоянной скоростью 1 В/с от 0 до 25 В, и температуре 293 К. Проводят термическую обработку при температуре 523 К в течение 5 ч. Контактные площадки напыляют методом вакуумного термического испарения через металлические маски. Благодаря использованию смеси тантала и оксида тантала расширяется диапазон возможных ПС, а пассивация электрохимическим анодированием дает возможность подгонки номинала ТПР в процессе изготовления. Однако данный способ обладает существенными недостатками. Невозможно сформировать высокоомные ТПР с низким и стабильным ТКС из-за взаимоисключающего влияния методов формирования, параметров и состава пленки на ее электрофизические характеристики. Из-за плохой контролируемости соотношений оксидной и металлической фаз и толщины пленки снижаются точность и воспроизводимость получения ТПР с заданными параметрами, а вследствие хаотичного распределения диэлектрической фазы в резистивной пленке сложно управлять ее электрофизическими характеристиками, из-за чего не представляется возможным сформировать прецизионные ТПР со стабильными и воспроизводимыми характеристиками. В результате ухудшается качество и снижается процент выхода годных ТПР.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому изобретению является способ изготовления интегрального тонкопленочного резистора кремниевой интегральной микросхемы на основе сплава РС-3710 [3]. Для осуществления способа после формирования первого уровня алюминиевой металлизации на пластину наносят межуровневый диэлектрик из низкотемпературного фосфоросиликатного стекла или плазмохимического оксида, а поверх него магнетронным распылением наносят пленку тантала, после чего стандартными методами фотолитографии и травления формируют его топологический ри-

сунок. Затем производят термообработку структуры в среде кислорода при температуре 450-475 °С, в результате чего пленка тантала окисляется с образованием пентаоксида тантала. После этого методами вакуумного напыления наносят пленку резистивного материала РС-3710 (состав, %: Si 50-56, Cr 36-39, Ni 8-11; ПС при толщине 15 нм: 500-600 Ом/□) и пленку неокисленного тантала, а последующими фотолитографией и травлением формируют их топологический рисунок. Далее методами фотолитографии и травления производят вскрытие контактных окон к первому уровню металлизации и магнетронным распылением наносят слой алюминия или его сплавов. После формирования фотолитографией и травлением топологического рисунка второго уровня металлизации проводят термообработку структуры при температуре 450-475 °С в среде кислорода, в результате чего пленка тантала окисляется с образованием пентаоксида тантала, в то время как между металлизацией второго уровня и пленкой резистивного материала остается слой неокисленного тантала.

Описанный способ может быть использован для получения резисторов в интегральном исполнении, но обладает существенными недостатками. Резистивный сплав РС-3710 имеет многокомпонентный состав, которым сложно управлять с высокой точностью, что приводит к существенному отклонению выходных параметров ТПР от расчетных. Для формирования высокоомных резисторов (≥ 1000 Ом/□) толщина резистивной пленки РС-3710 будет составлять ≤ 10 нм, а при такой толщине невозможно сформировать равномерный слой резистивной пленки с воспроизводимыми характеристиками, т.е. формирование высокоомных ТПР по данному способу не представляется возможным. Кроме того, не оценено влияние термообработки верхнего слоя тантала на проводящие характеристики резистивного сплава, которое несомненно присутствует. При всем этом неразрушающей подгонки номинала сопротивления по данному способу не предусмотрено.

Задачей представленного изобретения является расширение диапазона возможных сопротивлений, повышение термостабильности (снижение ТКС) и точности обеспечения номинала сопротивления, повышение надежности ТПР за счет формирования в составе ТПР резистивной пленки с наноразмерной самоорганизованной периодической структуризацией и возможностью неразрушающей подгонки номинала сопротивления в процессе изготовления ТПР.

Поставленная задача решается тем, что в известном способе изготовления ТПР, включающем нанесение на диэлектрическую подложку резистивной пленки тантала, слоя алюминия, защитной пленки тантала, формирование топологического рисунка контактных площадок с помощью фотолитографии и травления, формирование топологического рисунка резистивного слоя с помощью фотолитографии и травления, термическое доокисление пленки тантала, вскрытие контактных окон методами фотолитографии и травления к обкладкам ТПР в масках из термически окисленной защитной пленки тантала, после процесса формирования топологического рисунка контактных площадок проводят электрохимическое анодирование слоя алюминия, реанодирование резистивной пленки тантала и наносят дополнительную пленку тантала.

Реанодирование резистивной пленки тантала проводят при анодном напряжении, изменяющемся с постоянной скоростью от нуля до величины, определяемой в соответствии с математическим выражением:

$$E = k \left(105,73 - 35,36e^{(2,06 - \rho f)} - 28,24e^{(0,04 - \rho f / 54,75)} \right), \quad (1)$$

где k - размерный коэффициент, равный 1 В;

ρ - удельное поверхностное сопротивление готового резистора, выбираемое при его проектировании из интервала от 150 до 11420 Ом/□ с учетом задаваемой толщины защитной пленки тантала, связанной с напряжением E соотношением $h_{зп} > 0,64Ed$;

f - размерный коэффициент, равный 0,6 □/Ом;

d - размерный поправочный коэффициент, равный 1 нм/В.

На фиг. 1-7 представлены основные этапы изготовления ТПР.

На диэлектрическую подложку 1 последовательно наносят резистивную пленку тантала 2, слой алюминия 3 и защитную пленку тантала 4 (фиг. 1). По рисунку контактных площадок ТПР формируют маски 5 из защитной пленки тантала 4 с помощью фотолитографии и травления (фиг. 2). Затем проводят пористое электрохимическое анодирование слоя алюминия 3, например, в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты и реанодирование резистивной пленки тантала 2, при этом маски из защитной пленки тантала 5 окисляются и становятся масками из оксида тантала 6, а сплошная резистивная пленка тантала 2 преобразуется в ячеистую пленку тантала с наноразмерной самоорганизованной периодической структуризацией со встроенными наноразмерными диэлектрическими неоднородностями - островками оксида тантала 7 под разделительным изоляционным слоем из пористого АОА 8, расположенным на пространстве вокруг контактных площадок ТПР 9 (фиг. 3). Реанодирование резистивной пленки тантала проводят, например, в 1 %-ном водном растворе лимонной кислоты при анодном напряжении, изменяющемся с постоянной скоростью от нуля до величины E , определяемой по формуле 1. Толщина защитной пленки тантала должна превышать произведение 0,64 Ed. Затем наносят дополнительную пленку тантала 10 (фиг. 4). По рисунку резистивного слоя ТПР формируют маску 11 из дополнительной пленки тантала 10 с помощью фотолитографии и травления (фиг. 5), проводят термическое доокисление участков резистивной пленки тантала 12, не закрытых масками из защитной и дополнительной пленок тантала (фиг. 6). Затем с помощью фотолитографии и травления вскрывают контактные окна 13 к обкладкам ТПР в масках 6 из термически окисленной защитной пленки тантала (фиг. 7).

При формировании резистивного слоя ТПР необходимо учитывать следующие особенности. После пористого анодирования слоя алюминия 3 и в результате реанодирования резистивной пленки тантала через поры в АОА 2 (фиг. 3) происходит локальное окисление пленки тантала под слоем пористого АОА. В результате сплошная пленка тантала преобразуется в ячеистую пленку с наноразмерной самоорганизованной периодической структуризацией 14, окружающую регулярно расположенные наноразмерные диэлектрические неоднородности - островки оксида тантала 15, находящиеся под изоляционным слоем из пористого АОА 8 (фиг. 7). ПС такой пленки оказывается существенно больше, чем ПС исходной пленки тантала. Далее, сопротивление ячеистоостровковой пленки будет меняться (возрастать) по мере увеличения напряжения реанодирования. Этот эффект можно использовать как для получения требуемого номинала сопротивления резистора, так и для прецизионной подгонки сопротивления резистора. Для формирования резистивного слоя с требуемым ПС (ТПР с заданным номиналом сопротивления) необходимо рассчитать величину напряжения реанодирования E по формуле 1. Маска из защитной пленки тантала должна иметь толщину, которая полностью исключит возможность окисления защищаемой поверхности алюминия при пористом анодировании и последующем реанодировании, что выражается неравенством $h_{зп} > 0,64 Ed$.

Были осуществлены три примера практической реализации предлагаемого способа, в соответствии с которыми изготавливали тестовые ТПР с одинаковой топологией. На каждой подложке располагались 12 ТПР с размерами контактных площадок 8×3 мм и резистивного слоя $40 \times 0,1$ мм. Во всех примерах реализации предлагаемого способа использовали различные подложки, варьировали толщину слоя алюминия и защитной пленки тантала и, соответственно, режимы реанодирования. Для всех изготовленных ТПР измеряли их начальное сопротивление, определяли точность обеспечения номинала сопротивления, затем измеряли сопротивление при разных температурах и в течение 1000 ч, максимально пропускаемый ток и прикладываемое напряжение; затем вычисляли мощность рассеивания P , температурный коэффициент сопротивления ТКС, коэффициент старения $K_{СТ}$ и процент выхода годных ТПР. В таблице приводятся сравнительные результаты статистической обработки измерений и вычислений параметров тестовых ТПР, изготовленных в соответ-

BY 18757 C1 2014.12.30

ствии с тремя примерами реализации предлагаемого способа и взятых из источника [3] для известного способа.

Результаты статистической обработки измерений и вычислений параметров тестовых ТПР, изготовленных в соответствии с тремя примерами реализации предлагаемого способа и взятых из источника [3] для известного способа

Способ реализации	Определяемые параметры ТПР					
	ρ , Ом/□	P, мВт/мм ²	ТКС·10 ⁶ К ⁻¹	K _{СТ} ·10 ⁵ Ом/ч	Отклонение номинала резистора, %	Выход годных, %
Известный	600		2000	50 (100 ч)		96
Заявляемый, пример 1	150	21,5	3	2,4 (1000 ч)	1,4	90
Заявляемый, пример 2	380	22,0	5	2,5 (1000 ч)	1,8	80
Заявляемый, пример 3	5800	24,0	8	2,4 (1000 ч)	2,9	85

Пример 1.

Ситалловую подложку СТ 50-1 подвергали химической обработке в перекисно-аммиачном растворе с последующими промывкой в проточной дистиллированной воде и сушкой на центрифуге. На лицевую (полированную) сторону подложки наносили в едином вакуумном цикле методом магнетронного напыления резистивную пленку тантала толщиной 22 нм, слой алюминия толщиной 690 нм и защитную пленку тантала толщиной 34 нм. По рисунку контактных площадок ТПР формировали маски из позитивного фоторезиста ФП-383. Проводили плазмохимическое травление в SF₆-плазме не закрытых фоторезистом участков защитной пленки тантала. Проводили плазмохимическое удаление фоторезиста в кислородной плазме. Проводили пористое электрохимическое анодирование слоя алюминия в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты при температуре 296,0 К и напряжении формовки 53,0 В, затем проводили реанодирование резистивной пленки тантала через поры в АОА в 1 %-ном водном растворе лимонной кислоты при анодном напряжении, изменяющемся с постоянной скоростью от 0 до 53,0 В. Проводили промывку в дистиллированной воде и сушку на центрифуге. Наносили дополнительную пленку тантала толщиной 34 нм. По рисунку резистивного слоя ТПР формировали маски из позитивного фоторезиста ФП-383. Проводили плазмохимическое травление в SF₆-плазме не защищенных фоторезистом участков дополнительной пленки тантала. Проводили плазмохимическое удаление в кислородной плазме фоторезиста. Проводили термообработку в среде влажного кислорода при температуре 723,0 К в течение 30 мин. По обратному рисунку контактных окон с обкладками ТПР формировали маски из позитивного фоторезиста ФП-383Т. Для вскрытия контактных окон проводили плазмохимическое травление в SF₆-плазме не закрытых фоторезистом участков масок из термически окисленной защитной пленки тантала. Проводили визуальный контроль качества и контроль функционирования ТПР.

Пример 2.

На кремниевую подложку со слоем SiO₂ наносили в едином вакуумном цикле методом магнетронного напыления резистивную пленку тантала толщиной 22 нм, слой алюминия толщиной 800 нм и защитную пленку тантала толщиной 52 нм. По рисунку контактных площадок ТПР формировали маски из позитивного фоторезиста ФП-383. Проводили плазмохимическое травление в SF₆-плазме не закрытых фоторезистом участков защитной пленки тантала.

ВУ 18757 С1 2014.12.30

Проводили плазмохимическое удаление в кислородной плазме фоторезиста. Проводили пористое электрохимическое анодирование слоя алюминия в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты при температуре 296,0 К и напряжении формовки 53,0 В, затем проводили реанодирование резистивной пленки тантала через поры в АОА в 1 %-ном водном растворе лимонной кислоты при анодном напряжении, изменяющемся с постоянной скоростью от 0 до 80,0 В. Проводили промывку в дистиллированной воде и сушку на центрифуге. Наносили дополнительную пленку тантала толщиной 34 нм. По рисунку резистивного слоя ТПР формировали маски из позитивного фоторезиста ФП-383. Проводили плазмохимическое травление в SF₆-плазме не защищенных фоторезистом участков дополнительной пленки тантала. Проводили плазмохимическое удаление в кислородной плазме фоторезиста. Проводили термообработку в среде влажного кислорода при температуре 723,0 К в течение 30 мин. По обратному рисунку контактных окон с обкладками ТПР формировали маски из позитивного фоторезиста ФП-383Т. Для вскрытия контактных окон проводили плазмохимическое травление в SF₆-плазме не закрытых фоторезистом участков масок из термически окисленной защитной пленки тантала. Проводили визуальный контроль качества и контроль функционирования ТПР.

Пример 3.

Алюминиевую анодированную подложку грунтовали, полировали и подвергали ионной очистке. На лицевую (полированную) сторону подложки наносили методом магнетронного напыления в едином вакуумном цикле резистивную пленку тантала толщиной 22 нм, слой алюминия толщиной 100 нм и защитную пленку тантала толщиной 64 нм. По рисунку контактных площадок ТПР формировали маски из позитивного фоторезиста ФП-383. Проводили плазмохимическое травление в SF₆-плазме не защищенных фоторезистом участков защитной пленки тантала. Проводили плазмохимическое удаление в кислородной плазме фоторезиста. Проводили пористое электрохимическое анодирование слоя алюминия в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты при температуре 296,0 К и напряжении формовки 53,0 В, затем проводили реанодирование резистивной пленки тантала через поры в АОА в 1 %-ном водном растворе лимонной кислоты при анодном напряжении, изменяющемся с постоянной скоростью от 0 до 100,0 В. Проводили промывку в дистиллированной воде и сушку на центрифуге. Наносили дополнительную пленку тантала толщиной 34 нм. По рисунку резистивного слоя ТПР формировали маски из позитивного фоторезиста ФП-383. Проводили плазмохимическое травление в SF₆-плазме не защищенных фоторезистом участков дополнительной пленки тантала. Проводили плазмохимическое удаление в кислородной плазме фоторезиста. Проводили термообработку в среде влажного кислорода при температуре 723,0 К в течение 30 мин. По обратному рисунку контактных окон с обкладками ТПР формировали маски из позитивного фоторезиста ФП-383Т. Для вскрытия контактных окон проводили плазмохимическое травление в SF₆-плазме не закрытых фоторезистом участков масок из термически окисленной защитной пленки тантала. Проводили визуальный контроль качества и контроль функционирования ТПР.

Из таблицы видно, что для ТПР, изготовленных по предлагаемому способу, поверхностное сопротивление может варьироваться от 150 Ом/□ до 5,8 кОм/□ в зависимости от напряжения реанодирования E, что на порядок больше, ТКС примерно на три порядка меньше, а коэффициент старения в два раза меньше по сравнению с ТПР, изготовленными по известному способу. При этом точность обеспечения номинала для известного способа не оценена, а для предлагаемого соответствует уровню прецизионных резисторов.

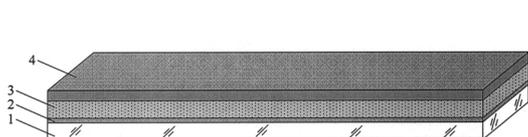
Таким образом, результаты практической реализации показали, что предлагаемый способ позволяет получить высококачественный планарный ТПР, состоящий из оксидов алюминия и тантала, который по сравнению с известным способом приводит к улучшению эксплуатационных характеристик ТПР: расширению диапазона возможных ПС, повышению термостабильности (снижению ТКС) и повышению надежности ТПР.

BY 18757 C1 2014.12.30

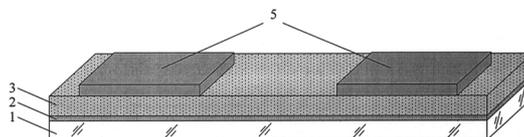
Применение резистивной пленки с наноразмерной самоорганизованной периодической структуризацией вместо комбинации резистивного сплава с окисленной пленкой тантала дает существенное улучшение параметров ТПР и значительное упрощение технологии изготовления, снижение дефектности топологических структур ТПР и возможность неразрушающей подгонки номинала сопротивления в процессе изготовления ТПР. Применение масок из пленок тантала, имеющих определенную толщину, приводит к улучшению планарности топологических слоев ТПР, что дополнительно уменьшает дефектность резистивного слоя и топологических слоев ТПР и способствует повышению надежности и выхода годных изделий.

Источники информации:

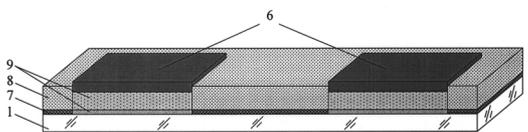
1. Wagner S.R.A 2500 Ω/\square TANTALUM THIN FILM RESISTOR FOR SILICON INTEGRATED CIRCUITS / M.J. Walker, Philco Corp., Lansdale, Pa. // Electron Devices Meeting, 1965 International. - 1965. - Vol. 11. - P. 37.
2. Патент США 3258413 МПК С 23С 14/00, С 23С 14/08, С 23С 14/58, 1966.
3. Патент Республики Беларусь 11811, МПК Н 01L 29/00, Н 01L 49/02, 2009.



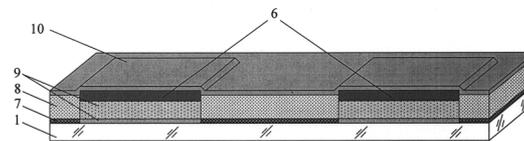
Фиг. 1



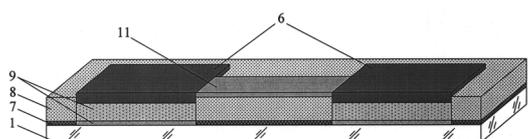
Фиг. 2



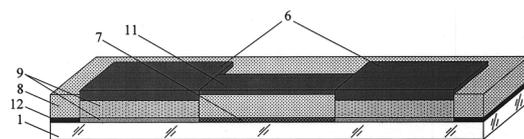
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6