

МНОГОУРОВНЕВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

© С. И. Бабкин¹, С. И. Волков¹, К. С. Есенкин², А. С. Новоселов¹, А. А. Столяров¹

¹ФГУ «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований РАН», 117218, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36-1

²АО «Зеленоградский нанотехнологический центр», 124527, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Солнечная аллея, д. 6

Исследованы различные конструктивно-технологические варианты трёхуровневой металлизации на основе плёнок алюминия, титана, нитрида титана и вольфрама. Плёнки вольфрама использовались в качестве проводящих шин и межуровневых соединений и осаждались из газовой фазы в режимах, обеспечивающих конформное заполнение переходных отверстий и низкие механические напряжения в шинах. Исследованы параметры и характеристики надёжности многоуровневой металлизации при работе в условиях высокой температуры и большой плотности тока.

Ключевые слова: многоуровневая металлизация, высокая температура, вольфрам

Сведения об авторах: Бабкин Сергей Иванович, к.т.н., Sergey_Babkin@srisa.ru, sbihome@mail.ru; Волков Святослав Игоревич, к.т.н., Sviatoslav_Volkov@srisa.ru; Есенкин Кирилл Сергеевич, esenkin@zntc.ru; Новоселов Антон Сергеевич, Anton_Novoselov@srisa.ru; Столяров Александр Александрович, Alexander_Stolyarov@srisa.ru

Благодарность: Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования «Диагностика и модификация микроструктур и нанобъектов» МИЭТ за содействие в проведении исследований.

MULTILEVEL METALLIZATION FOR HIGH TEMPERATURE MICROELECTRONICS

S. I. Babkin¹, S. I. Volkov¹, K. S. Esenkin², A. S. Novoselov¹, A. A. Stolyarov¹

¹FSI «Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences», 117218, Moscow, Nakhimovskiy prospect, 36/1

²JSC «Zelenograd nanotechnology center», 124527, Zelenograd, Solnechnaya alleya, 6

Different ways of structural and technological realization of three-level metallization using aluminum, titanium, titanium-nitride and tungsten films were studied in this research. Thin tungsten films were used as conducting wires and inter-layer interconnections, and were deposited by CVD process in different modes, which provided conformal filling of via-holes and low mechanical stress of interconnections. Reliability behavior of multilevel metallization was examined under high temperature and large current density conditions.

Keywords: multilevel metallization, high temperature, tungsten

Data of authors: Babkin Sergey Ivanovich, Ph.D., Sergey_Babkin@srisa.ru, sbihome@mail.ru; Volkov Svyatoslav Igorevich, Ph.D., Sviatoslav_Volkov@srisa.ru; Esenkin Kirill Sergeevich, esenkin@zntc.ru; Novoselov Anton Sergeevich, Anton_Novoselov@srisa.ru; Stolyarov Aleksandr Aleksandrovich, Alexander_Stolyarov@srisa.ru

Acknowledgements: Authors show their gratitude to specialists of National Research University of Electronic Technology Common use center «Diagnosis and development of microstructures and nanoobjects» for their assistance in the research.

Введение

Разработка изделий микроэлектроники, работающих при экстремально высоких температурах 200-600 °С (далее – высокотемпературная микроэлектроника), в настоящее время является одним из быстроразвивающихся направлений. Это обусловлено потребностями промышленной электроники, геологоразведки, автомобильной и авиационной промышленности, ракетно-космической техники. Лидерами в производстве изделий высокотемпературной микроэлектроники являются фирмы Honeywell, Texas Instruments, Analog Devices [1].

Создание высокотемпературных микросхем требует решения двух основных задач. Первая состоит в сохранении работоспособности больших интегральных схем (БИС) при высоких температурах. Вторая – в обеспечении их надёжности, поскольку характерные процессы деградации, приводящие к отказам активных и пассивных элементов БИС, активируются с ростом температуры.

Одним из методов решения указанных проблем является использование нетрадиционных для технологии БИС материалов. В части активных элементов (транзисторов, диодов) применение полупроводников с большой шириной запрещённой зоны, таких как карбид кремния – SiC, арсенид галлия – GaAs, нитрид галлия – GaN [2]. В то же время для изготовления КМОП БИС широко используется кремний в варианте кремний на изоляторе (КНИ), предельная рабочая температура которого оценивается как 400 °С [3].

В части многослойной металлизации БИС рассматриваются различные варианты алюминиевой или медной разводки, традиционной для технологии БИС [4-5]. При этом с точки зрения надёжности очевидным преимуществом обладают системы, использующие тугоплавкие металлы, прежде всего вольфрам. В сравнении с алюминием вольфрам характеризуется высокой температурой взаимодействия с кремнием и низким значением коэффициента линейного расширения. Эти факторы создают предпосылки для более высокой надёжности многослойной металлизации, работающей в условиях температурных циклов большо-

го диапазона. Вольфрам достаточно давно рассматривался как материал для шин металлизации БИС, работающих при высоких температурах и плотностях тока [6-7]. Недостатком вольфрама являются высокое (относительно алюминия) удельное сопротивление, большие значения механических напряжений, необходимость использования специфических процессов плазмохимического травления при формировании шин металлизации, а также необходимость формирования дополнительных контактных площадок из алюминия или золота для сборки. В то же время такие компании как Fraunhofer и Tekmos, гарантирующие долговременную работоспособность своих изделий при температуре 250 °С, используют вольфрамовую металлизацию [8-9].

Вольфрам, осаждаемый из газовой фазы, традиционно применяется в системах алюминиевой металлизации для создания переходных контактов между уровнями, а иногда и для формирования шин первого уровня. В этом слое допустимо относительно высокое удельное сопротивление металла, поскольку используются достаточно короткие шины. В других слоях многослойной металлизации БИС используются шины с различным соотношением длины и ширины. Существующие правила проектирования БИС учитывают свойства используемых материалов (обычно структуры на основе плёнок титана, алюминия, нитрид титана). В случае с вольфрамом формирование широких шин может вызывать трудности из-за возникающих в плёнке в процессе осаждения больших механических напряжений.

В данной работе исследовались особенности технологии формирования многослойной металлизации, предусматривающей её максимальную унификацию с традиционными процессами формирования алюминиевой металлизации. Проведены сравнительные исследования деградационной устойчивости вольфрамовой и различных вариантов алюминиевой металлизации при работе в экстремальных условиях, характеризующихся большими значениями температуры и плотности тока.

Методика подготовки образцов и проведения экспериментов

Укрупнённая последовательность формирования трёхуровневой металлизации, соответствующая правилам проектирования КМОП БИС с минимальными топологическими размерами 0,5 мкм, может быть представлена в виде следующих блоков технологических операций:

1. формирование изолирующего диэлектрика ($\text{FCC}+\text{SiO}_2$ $H = 1$ мкм);
2. формирование контактных окон (\varnothing 0,5 мкм);
3. осаждение структуры Ti-TiN-W ($H_W = 0,5$ мкм);
4. химико-механическая полировка вольфрама;
- 5а. осаждение структуры Ti-Al-Ti-TiN ($H_{Al} = 0,5$ мкм);
- 5б. осаждение структуры Ti-TiN-W-Ti-TiN ($H_W = 0,5$ мкм);
- 6а. формирование шин металлизации уровня M1 на основе структуры 5а с минимальной шириной шины 0,5 мкм;
- 6б. формирование шин металлизации уровня M1 на основе структуры 5б;
7. формирование межуровневого диэлектрика (SiO_2 $H = 1$ мкм);
8. формирование переходных окон (\varnothing 0,5 мкм);
9. осаждение структуры Ti-TiN-W ($H_W = 0,5$ мкм);
10. химико-механическая полировка вольфрама;
- 11а. осаждение структуры Ti-Al-Ti-TiN ($H_{Al} = 0,5$ мкм);
- 11б. осаждение структуры Ti-TiN-W-Ti-TiN ($H_W = 0,5$ мкм);
- 12а. формирование шин металлизации уровня M2 на основе структуры 11а с минимальной шириной шины 0,8 мкм;
- 12б. формирование шин металлизации уровня M2 на основе структуры 11б;
13. формирование межуровневого диэлектрика (SiO_2 $H = 1$ мкм);
14. формирование переходных окон (\varnothing 0,5 мкм);
15. осаждение структуры Ti-TiN-W ($H_W = 0,5$ мкм);

16. химико-механическая полировка вольфрама;

17а. осаждение структуры Ti-Al-Ti-TiN ($H_{Al} = 0,75$ мкм);

17б. осаждение структуры Ti-TiN-W-Ti-TiN ($H_W = 0,5$ мкм);

18а. формирование шин металлизации уровня M3 на основе структуры 17а с минимальной шириной шины 0,8 мкм;

18б. формирование шин металлизации уровня M3 на основе структуры 17б;

19. формирование пассивирующего диэлектрика ($\text{FCC}+\text{SiO}_2$ $H = 1$ мкм);

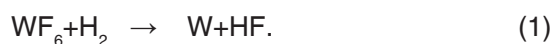
20. формирование алюминиевых контактных площадок.

Исследовались эффективность использования многослойной структуры Ti-Al-Ti-TiN и влияние температуры осаждения алюминия (350 °C и 200 °C), отмеченные в работах [11, 12], на надёжность шин металлизации. Для этого изготавливались различные варианты (B1, B2, B3, B4) структур алюминиевой металлизации (операции 5а, 11а, 17а), характеристики которых представлены в табл. 1.

Содержание меди в сплаве Al(Cu) во всех вариантах составляло 0,5 %.

Для травления указанных структур применялось реактивно-ионное травление в смеси $\text{BCl}_3+\text{Cl}_2+\text{N}_2$ в установке Metal Etch Centura ф. Applied Materials.

При выполнении операций 3, 9, 15 использовался процесс осаждения вольфрама в результате химической реакции газообразных реагентов на поверхности пластины:



Для качественного формирования переходных контактов (заполнения отверстий) применяются относительно большие расходы, что предполагает проведение процесса в области, ограниченной скоростью реакции на поверхности. Получаемые при этом плёнки характеризуются высоким значением растягивающих механических напряжений ($\sim 1,2 \times 10^{10}$ дин/см²) [13]. При осаждении плёнок вольфрама данным методом необ-

Таблица 1

Варианты структуры исследуемой алюминиевой металлизации

Вариант	Уровень металлизации	Ti	Al	Ti	Al	Ti	TiN	Т ос. Al °С
		Н, нм	Н, нм	Н, нм	Н, нм	Н, нм	Н, нм	
B1	M1,M2	20	500	20	-	-	70	350
	M3	20	750	20	-	-	70	
B2	M1,M2	20	500	20	-	-	70	200
	M3	20	750	20	-	-	70	
B3	M1,M2	20	250	20	250	20	70	350
	M3	20	750	20	-	-	70	
B4	M1,M2	20	250	20	250	20	70	200
	M3	20	750	20	-	-	70	

ходимо использовать подслои титан-нитрид титана (Ti-TiN), обеспечивающий адгезию к окислу и его защиту от возможного взаимодействия с HF. Минимальная толщина защитного слоя TiN зависит от метода получения и при использовании реактивного магнетронного распыления титановой мишени составляет ~10 нм. Следует также отметить, что плёнки Ti-TiN характеризуются сжимающими механическими напряжениями. Для заполнения переходных окон \varnothing 0,5 мкм в межслойном диэлектрике $H = 1$ мкм с применением метода реактивного магнетронного распыления титановой мишени и коллиматора осаждалась структура:

V0: Ti (20 нм) - TiN (70 нм) - W (500 нм).

Для формирования шин вольфрамовой металлизации осаждалась структура:

V01: Ti (10 нм) - TiN (10 нм) - W (500 нм) - Ti (10 нм) - TiN (70 нм).

В этом случае осаждение плёнки вольфрама по (1) проводилось в области, ограниченной процессами массопереноса, что предполагает более низкие скорости осаждения и, как следствие, меньшие механические напряжения. Наличие в структуре плёнок Ti-TiN также снижает результирующее значение механических напряжений. Кроме того, наличие верхнего TiN (70 нм) и одинаковая суммарная толщина шины, составляющая около 600 нм, позволяют сохранять используемые процессы осаждения межуровневого диэлектрика и травления переходных отверстий.

Структура V01 травилась последовательно в смеси Cl_2+Ar , затем в SF_6+Ar+O_2 и снова в смеси Cl_2+Ar в установке плазмохимического травления STS VPX с модулями травления металлов ICP, предусматривающую возможность охлаждения катода до температуры -10 °С. В этом случае обеспечивалась достаточно высокая скорость и анизотропия травления вольфрама и селективность травления к окислу и фоторезисту.

Параметры многоуровневой металлизации исследовались с использованием тестовых элементов на измерительном комплексе Agilent Technologies B 1500, имеющем возможность подогрева столика до температуры 200 °С.

Описание тестовых элементов и исследуемые параметры металлизации приведены в табл. 2. За время наступления отказа ($T_{отк}$) принималось время достижения 30 % изменения сопротивления тестового элемента относительно исходного значения при данной эффективной температуре.

Изготовленные и испытанные структуры металлизации исследовались на электронно-ионном микроскопе Helios NanoLab 650 и растровом электронном микроскопе (РЭМ) Leo 1455 VP.

Основные результаты и их обсуждение

В табл. 3 представлены параметры трёхуровневой металлизации, изготовленной с использованием различных

Таблица 2

Тестовые элементы и исследуемые параметры металлизации

Тестовый элемент, описание (обозначение)	Наименование измеряемого параметра (обозначение), [единица измерения]
Резистор в форме меандра на основе шин металлизации (RM)	Удельное поверхностное сопротивление шин металлизации ($rosM$), [Ом/кв]
Элемент Кельвина (KV)	Сопротивление единичного перехода между двумя уровнями металлизации (R_k), [Ом/контакт] Температурный коэффициент сопротивления резистора на основе перехода (ТКС R_k), [1/град К]
Цепочка контактов между двумя уровнями металлизации (LK)	Среднее сопротивление перехода между двумя уровнями металлизации (ros), [Ом/контакт] Температурный коэффициент сопротивления резистора на основе цепочки контактов (ТКС LK), [1/град К] Время отказа резистора на основе цепочки контактов ($T_{отк}$ LK), [с]
Резистор мостового типа на основе шин металлизации (RM0)	Температурный коэффициент сопротивления резистора на основе шин металлизации (ТКС M), [1/град К] Время отказа резистора ($T_{отк}$ RM0), [с]

Таблица 3

Основные параметры трёхуровневой металлизации на основе плёнок алюминия

Параметр, единица измерения	Варианты структур шин металлизации			
	B1	B2	B3	B4
$rosM1$, Ом/кв	0,07	0,073	0,08	0,08
$rosM2$, Ом/кв	0,07	0,072	0,08	0,08
$rosM3$, Ом/кв	0,041	0,042	0,041	0,042
$RkM1_M2$, Ом/контакт	0,9	1,0	1,1	1,0
$RkM2_M3$, Ом/контакт	1,0	1,2	1,2	1,2
$RkM1_M3$, Ом/контакт	2,3	2,3	2,4	2,3
ТКС Rk M1_M2, 1/град К	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
ТКС M1, 1/град К	0,0034	0,0033	0,0030	0,0029
ТКС M2, 1/град К	0,0034	0,0034	0,0030	0,0029
ТКС M3, 1/град К	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035
ТКС LK M1_M2, 1/град К	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
ТКС LK M1_M3, 1/град К	0,0012	0,0012	0,0012	0,0012
$T_{отк}$ RM0, с $J = 1,23 \cdot 10^7$ А/см ² , $T = 500$ °K	3150	1380	640	660

вариантов структур для формирования шин металлизации В1, В2, В3, В4.

Из табл. 3 следует, что поверхностное сопротивление $rosM$ и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) шин металлизации М слабо зависят от температуры осаждения алюминия. Это объясняется тем, что формирование межуровневого диэлектрика (операции 7, 13) и пассивирующего диэлектрика (операция 19) происходит при более высоких температурах 400 °С и 480 °С соответственно. Это приводит к уравнивающему отжигу исходных тонкоплёночных структур. Этим можно также объяснить увеличение $rosM1$ и $rosM2$ и снижение ТКС М для структур В3 и В4. При этих температурах происходит взаимодействие алюминия и титана с образованием интерметаллического соединения Al_3Ti [14], что приводит к изменению указанных параметров.

Во время испытаний образцов при высоких плотностях тока необходимо учитывать перегрев проводника в результате выделения Джоулева тепла. С учётом измеренных ранее ТКС в диапазоне температур 25-200 °С можно оценить эффективную температуру проводника при прохождении через него тока различной плотности.

На рис. 1 представлены зависимости эффективной температуры шин трёхуровневой металлизации уровня М1 (кривые 1, 2), М2 (кривые 3, 4) и М3 (кривые 5, 6) для вариантов структур В1 (кривые 1, 3, 5) и В3 (кривые 2, 4, 6) от плотности проходящего тока.

Температура столика составляла 25 °С. При плотности тока более 3×10^6 А/см² наблюдается различие в эффективной температуре проводника в зависимости от местоположения в многоуровневой разводке и варианта тонкоплёночной структуры. Температура перегрева возрастает от М1 к М3, что связано с процессом теплоотвода от шины к подложке. Эффективная температура также увеличивается для варианта структуры с промежуточным слоем титана. Этот фактор необходимо учитывать при проведении ускоренных испытаний шин металлизации, а именно, в обеспечении одинаковых условий с точки зрения эффективной температуры и плотности тока. В дальнейшем оценка надёжности для различных вариантов проводников исследовалась для шин первого уровня металлизации.

Значения времён отказа $T_{отк}$ М для различных вариантов металлизации представлены в табл. 3. Из приведённых данных следует, что введение дополнительной прослойки

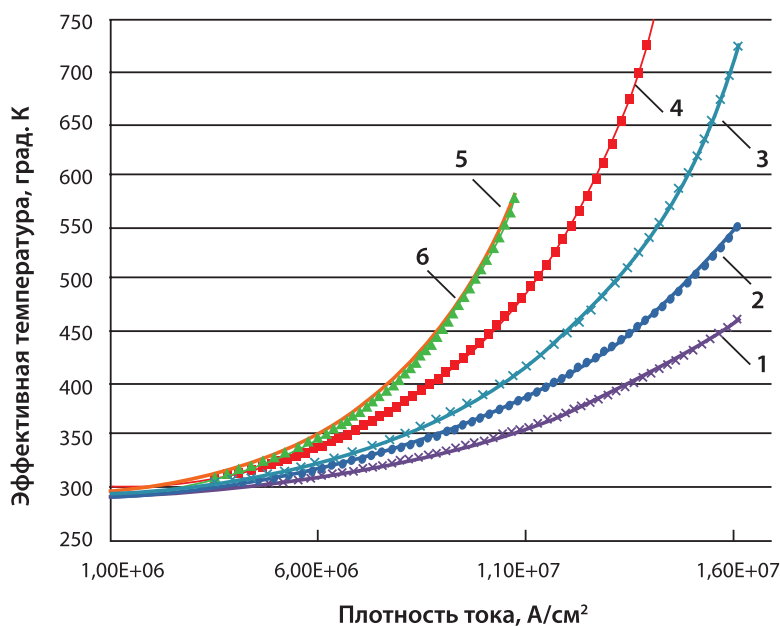


Рис. 1

Зависимость температуры шины металлизации от плотности тока для трёхуровневой металлизации

титана в структуру шин (варианты В3, В4) не повышает их надёжность. Наилучшие результаты получены для структуры на основе плёнок алюминия, осаждённых при температуре 350 °С. Известно, что высокая температура осаждения обеспечивает формирование плёнки алюминия большим размером зерна («бамбук»), что, в свою очередь, уменьшает эффект рассеяния электронов на границе зёрен, снижает интенсивность процесса массопереноса и образование пустот. В дальнейшем данный вариант алюминиевой металлизации сравнивался с металлизацией на основе плёнок вольфрама.

Одним из преимуществ вольфрамовой металлизации является возможность одновременного заполнения переходных отверстий и осаждение структуры, предназначенной для формирования шин металлизации. Это технологические операции 3, 5б, 9, 11б, 15, 17б. В этом случае маршрут упрощается, так как отсутствует необходимость проведения операций осаждения и химико-механической полировки вольфрама. На рис. 2 представлена микрофотография РЭМ шин металлизации, сформированных на основе структуры Ti-TiN-W. В этом случае вольфрам осаждался в режиме, обеспечивающем полное заполнение переходных окон. Видно, что после травления и удаления фоторезистивной маски происходит отслаивание широких шин ~10 мкм. Как отмечалось выше, это связано с большими механическими напряжениями в плёнке вольфрама, осаждаемой в указанном режиме. В существующих

правилах проектирования для алюминиевой металлизации предполагается возможность использования шин шириной более 10 мкм. С другой стороны, использование процесса осаждения вольфрама, ограниченного массопереносом реагентов в переходные отверстия, приводит к их неконформному заполнению, что сказывается на их надёжности [15]. Учитывая эти факторы, в дальнейшем при формировании трёхуровневой металлизации для межуровневых соединений и проводящих шин использовались различные режимы осаждения вольфрама.

На рис. 3 представлена микрофотография РЭМ сечения трёхуровневой вольфрамовой металлизации тестового кристалла, изготовленного на подложке кремний на изоляторе. В качестве межуровневых соединений использовалась структура В0 и структура В01 для проводящих шин. Аналогично (табл. 1) изготавливались трёхуровневая алюминиевая металлизация на основе структур В0 и В1.

Результаты измерения параметров трёхуровневой металлизации представлены в табл. 4. Из табл. 4 следует, что поверхностное сопротивление шин на основе вольфрама в 3 раза выше сопротивления шин на основе алюминия, что соответствует соотношению удельного объёмного сопротивления для этих материалов. Значения переходных сопротивлений для вольфрамовой металлизации также несколько выше, что объясняется влиянием тонкого слоя нитрида титана. При этом значения ТКС воль-

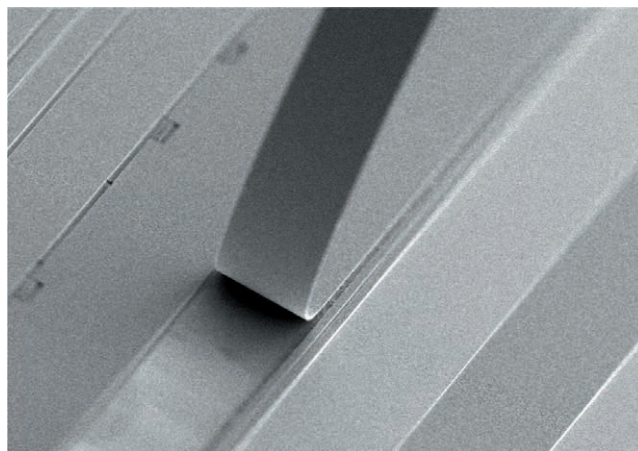


Рис. 2

Шины металлизации, сформированные на основе структуры Ti-TiN-W

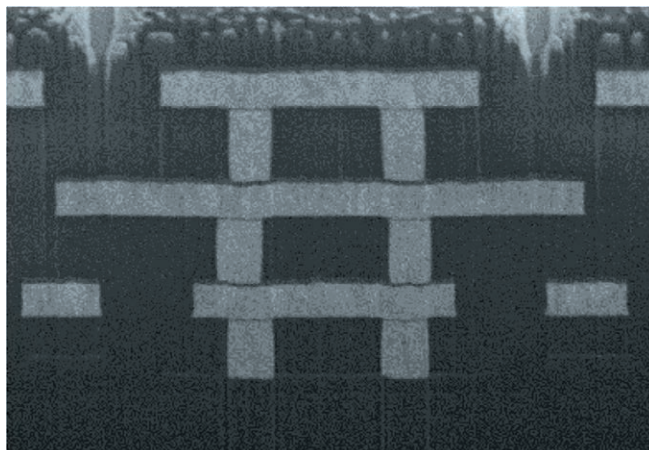


Рис. 3

Трёхуровневая вольфрамовая металлизация

фрамовых шин существенно меньше алюминиевых, что предполагает более высокую стабильность сопротивления при изменении температурных условий эксплуатации.

Сравнительная оценка надёжности изготовленных вариантов алюминиевой и вольфрамовой многоуровневой металлизации, как и в предыдущем случае, проводилась на основе методики ускоренных испытаний, характеризующихся значительно большей по сравнению с условиями эксплуатации величиной плотности тока, проходящего через шину и межуровневое соединение.

Задача заключалась в нахождении одинаковых условий испытаний, определяемых одинаковой эффективной температурой тестового элемента и плотностью проходящего тока. Температура рассчитывалась по результатам измерения сопротивления тестового элемента с учётом измененного ранее ТКС в диапазоне температур 25-200 °С и плотности тока 10⁵ А/см².

На рис. 4 представлена зависимость эффективной температуры тестового элемента RMO от плотности проходящего через него тока для вольфрамовых и алюминиевых шин.

Таблица 4

Параметры трёхуровневой металлизации на основе плёнок вольфрама и алюминия

Параметр, единица измерения	Алюминиевые шины, В1	Вольфрамовые шины, В01
rosM1, Ом/кв	0,07	0,21
rosM2, Ом/кв	0,07	0,21
rosM3, Ом/кв	0,042	0,21
rosM1_M2, Ом/контакт	0,9	1,1
rosM2_M3, Ом/контакт	1,0	1,2
rosM1_M3, Ом/контакт	2,0	2,4
ТКС M1,M2,M3, 1/град К	0,0035	0,0024
ТКС M1_M2, 1/град К	0,0012	0,0012
ТКС M1_M3, 1/град К	0,0012	0,0012
$T_{отк} RM0, c$ $J = 1,0 \cdot 10^7 A/cm^2, T = 50 \text{ } ^\circ K$	9000	>21600 ₍₁₎
$T_{отк} LK M1_M3, c$ $J = 2,1 \cdot 10^7 A/cm^2, T = 650 \text{ } ^\circ K$	900	>21600 ₍₁₎

(1) – Максимальное время тестирования

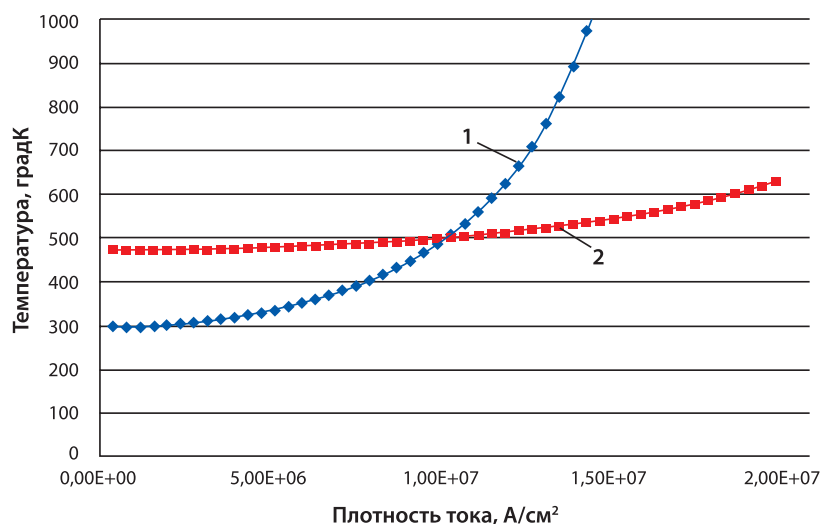


Рис. 4

Зависимость эффективной температуры тестового элемента RM0 от плотности протекающего тока через вольфрамовые (1) и алюминиевые шины (2)

При этом температура столика составила 25 °С и 200 °С соответственно. Точка пересечения указанных зависимостей определяет общие условия ускоренных испытаний, а именно плотность тока через шины $1,0 \times 10^7$ А/см² при эффективной температуре 500 °К. Фиксировалось время наступления отказа $T_{отк}$ М1. Для алюминиевой шины среднее значение времени составило 9000 с. Для вольфрамовой шины отказы отсутствовали в течение всего времени испытаний – 21600 с.

Ранее было показано, что надёжность алюминиевой металлизации чаще всего определяется дефектами, возникающими в области алюминиевой шины, прилегающей к вольфрамовому соединению. Это связано с локальными механическими напряжениями, температурными полями, дивергенцией потока электронов [10]. На рис. 5 представлена зависимость эффективной температуры тестового элемента LK M1_M3 от плотности проходящего через него тока

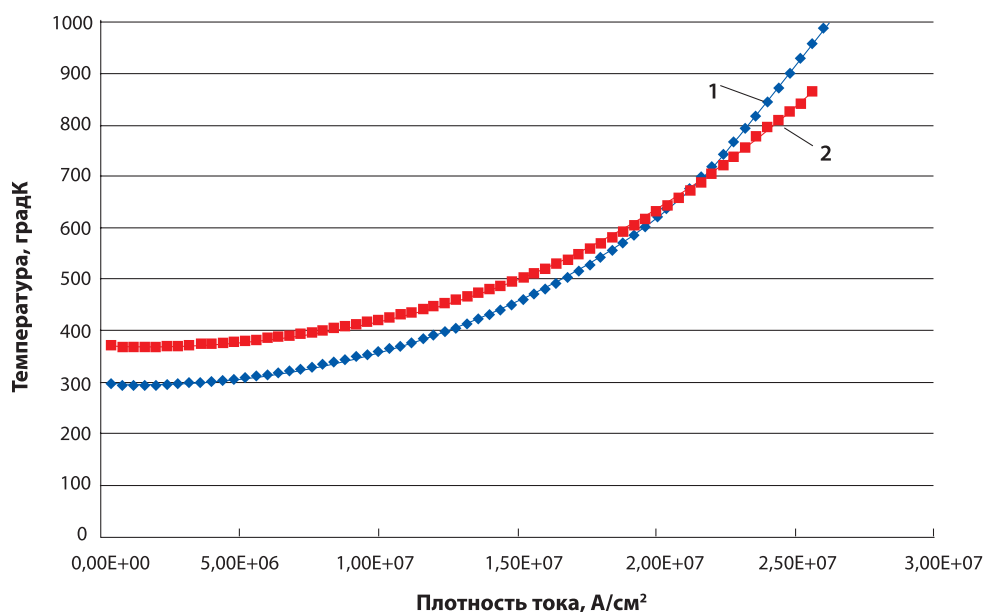


Рис. 5

Зависимость эффективной температуры тестового элемента LK M1_M3 от плотности протекающего тока через вольфрамовые (1) и алюминиевые шины (2)

для вольфрамовых и алюминиевых шин. Температура столика составила 20 °С и 100 °С соответственно. Точка пересечения указанных зависимостей, определяющая общие условия ускоренных испытаний, имела координаты по плотности тока $2,1 \times 10^7$ А/см² и эффективную температуру 650 °К. При этом значение плотности тока через вольфрамовое межуровневое соединение составляло $2,55 \times 10^7$ А/см². Для структуры с алюминиевыми шинами среднее значение времени наступления отказа составило 900 с (табл. 4). Для варианта с вольфрамовыми шинами отказ не был достигнут в течение всего времени испытаний (21600 с).

Тестовый элемент LK M1_M3 с алюминиевыми шинами после термотокового воздействия был исследован с использованием метода растровой электронной микроскопии (рис. 6). В этом случае отказ сопровождается появлением многочисленных шарообразных образований из алюминия, выходящих на поверхность пассивации кристалла (рис. 6а). Последующий анализ сечения структуры дефекта, проведённый с использованием фокусированного ионного пучка (FIB), показал, что выход алюминия на поверхность происходит через трещины в пассивации и сопровождается образованием пустот в алюминиевой шине (рис. 6б). Вероятной причиной появ-

ления такого вида дефектов является локальный перегрев шины тестового элемента до точки плавления. Большая разница температурного коэффициента расширения алюминия и двуокиси кремния приводит к возникновению больших механических напряжений и появлению трещин в пассивации. В варианте вольфрамовой металлизации указанные дефекты не обнаружены.

В настоящее время существует небольшое число технологических линий, на базе которых производятся микросхемы, работающие при высокой температуре. В табл. 5 приведены производители и основные характеристики используемых ими технологий [16].

Из табл. 5 следует, что передовой технологией в этом направлении является технология КМОП КНИ 0,35 мкм. С точки зрения проектных норм для металлизации (шаг металлизации, диаметр переходных отверстий) исследованная технология трёхуровневой металлизации для КМОП КНИ БИС с минимальным размером 0,5 мкм наиболее близка к данной технологии.

Выводы

Разработана трёхуровневая металлизация на основе плёнок титана, нитрида титана и вольфрама, полученного методом осаждения из газовой фазы. При форми-

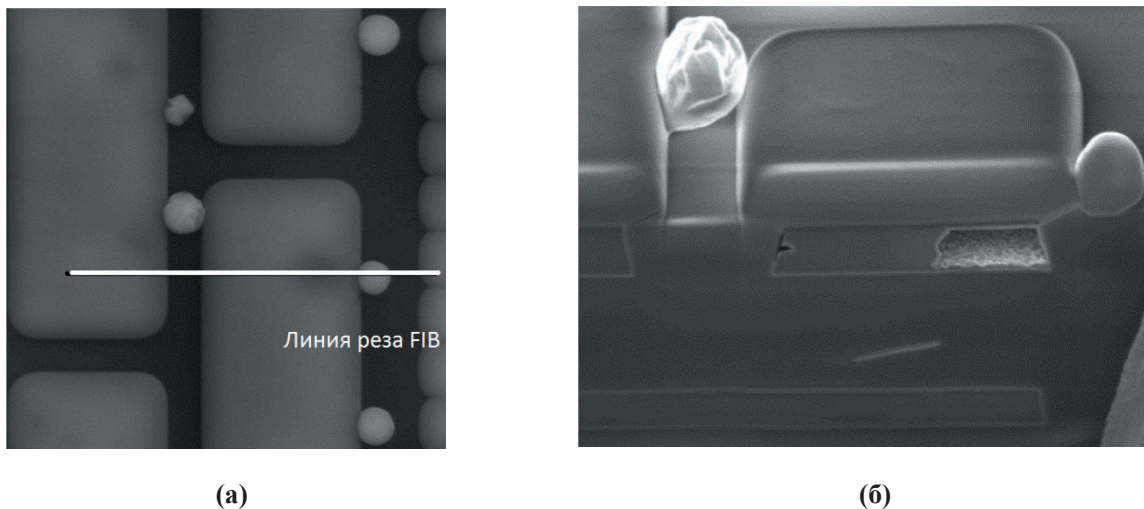


Рис. 6

Фрагмент тестового элемента LK M1_M3 после термотоковых воздействий: а) вид сверху, б) сечение после резки FIB

Характеристики технологий высокотемпературной микроэлектроники

Наименование технологии	HTSOI4	XI10	H10	H035
Производитель	Honeywell	X-FAB	Fraunhofer	Fraunhofer
Тип технологии	КМОП КНИ	КМОП КНИ	КМОП КНИ	КМОП КНИ
Минимальный размер, мкм	0,8	1,0	1,0	0,35
Число уровней металлизации	3	3	3	4
Металл шин металлизации	вольфрам	вольфрам	вольфрам	вольфрам

ровании межуровневых соединений и шин металлизации использовались различные модификации процесса осаждения, обеспечивающего конформное заполнение переходных отверстий и низкие механические напряжения в плёнках вольфрама. При суммарной толщине 0,6 мкм вольфрамовые шины имели удельное поверхностное сопротивление 0,21 Ом/кв, а межуровневые соединения сопротивление 1,1-1,2 Ом.

Проведены сравнительные исследования электромиграционной устойчивости вольфрамовой и алюминиевой металлизаций, изготовленных в рамках унифицированного технологического процесса. Испытания указанных вариантов проводились в одинаковых условиях, характеризующихся значениями плотности тока $(1,0-2,1) \times 10^7$ А/см² и эффективной температурой 500-650 °К. Для вольфрамовой металлизации не зафиксировано отказов в течение всего времени испытаний (6 часов).

Полученные параметры трёхуровневой металлизации сравнимы с параметрами металлизации, которую используют в настоящее время основные производители высокотемпературных КМОП КНИ БИС.

Исследованная система многоуровневой металлизации на основе плёнок вольфрама может быть использована при разработке технологии интегральных схем, работающих при высоких температурах.

Литература

1. Jeff Watson and Gustavo Castro High-temperature electronics pose design and reliability challenges // Analog Dialogue 46-04, April (2012), pp. 1-7.
2. Полищук А. Полупроводниковые материалы и приборы для жёстких условий эксплуатации // Современная электроника. – 2006. – № 4. – С. 20-24.
3. Vanhoenacker-Janvier D., M. El Kaamouchi and M. Si Moussa Silicon-on-insulator for high-temperature applications // IET Circuits Devices Syst., February 2008, vol. 2, no. 1.
4. Domenicucci A. G. et al. Effect of copper on the microstructure and electromigration lifetime of Ti-AlCu-Ti fine lines in the presence of tungsten diffusion barriers // J. Appl. Phys. 80 (9), November 1996, pp. 4952-4959.
5. Ilreike P. L. An Overview of high-temperature electronic device. Technologies and potential applications // IEEE Transactions on components, Packaging and manufacturing technology-part A, December 1994, vol. 17, no. 4, pp. 594-609.
6. Jian Chen, J-P Colinge Tungsten metallization technology for high temperature silicon-on-insulator devices // Materials Science and Engineering, 1995, B29, pp. 18-20.
7. Hain M. et al. A highly reliable, low cost 0.5 μm tree level tungsten metallization // Applied Surface Science, 1995, 91, pp. 374-377.
8. High-Temperature IC's. – Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS. – Режим доступа: www.ims.fraunhofer.de (дата обращения: 27.05.2016).
9. High Temperature ASICs 2500C and 200C. – Режим доступа: www.Tekmos.com (дата обращения: 25.05.2016).
10. Jiang Tao et al. Electromigration reliability of tungsten aluminum vias and improvements under AC current stress // IEEE transactions on electron devices, August 1993, vol. 40, no. 8, pp. 1398-1405.
11. Kazuyoshi Kamoshida Electromigration performance of AlCu/Ti and AlCu/Ti/TiN/Ti metallization //

- J. Vac. Sci. Technology, Nov/Dec 2001, B 19(6), pp. 2190-2194.
12. Donald S. Gardner et al. Layered and homogeneous films of aluminum and aluminum/silicon with titanium and tungsten for multilevel interconnects // IEEE Journal of Solid-State Circuits, February 1985, vol. SC-20, no. 1, pp. 94-103.
 13. Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology and Applications. – Second Edition by Hugh O. Pierson. – Norwich, New York, 1998.
 14. Тонкие плёнки. Взаимная диффузия и реакции / Под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера. – М.: Мир, 1982. – 575 с.
 15. Fumitoto Matsuoka et al. Electromigration reliability for a tungsten-filled via hole structure // IEEE transactions on electron devices, March 1990, vol. 37, no. 3, pp. 562-568.
 16. Stefan Dreiner et al. High temperature 0.35 micron SOI CMOS process (250 °C and beyond) // Proc. International Conference HiTEN, July 2015, Cambridge, UK.

References

1. Jeff Watson and Gustavo Castro High-temperature electronics pose design and reliability challenges // Analog Dialogue 46-04, April (2012), pp. 1-7.
2. Polischuk A. Semiconductor materials and equipment for abnormal operating conditions. *Sovremennaya elektronika* [Modern Electronics], 2006, № 4, pp. 20-24.
3. Vanhoenacker-Janvier D., M. El Kaamouchi and M. Si Moussa Silicon-on-insulator for high-temperature applications // IET Circuits Devices Syst., February 2008, vol. 2, no. 1.
4. Domenicucci A. G. et al. Effect of copper on the microstructure and electromigration lifetime of Ti-AlCu-Ti fine lines in the presence of tungsten diffusion barriers // J. Appl. Phys. 80 (9), November 1996, pp. 4952-4959.
5. Ilreike P. L. An Overview of high-temperature electronic device. Technologies and potential applications // IEEE Transactions on components. Packaging and manufacturing technology-part A, December 1994, vol. 17, no. 4, pp. 594-609.
6. Jian Chen, J-P Colinge Tungsten metallization technology for high temperature silicon-on-insulator devices // Materials Science and Engineering, 1995, B29, pp. 18-20.
7. Hain M. et al. A highly reliable, low cost 0.5 µm tree level tungsten metallization // Applied Surface Science, 1995, 91, pp. 374-377.
8. High-Temperature IC's. – Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS. – URL: www.ims.fraunhofer.de (accessed 27 May 2016).
9. High Temperature ASICs 2500C and 200C. – URL: www.Tekmos.com (accessed 25 May 2016).
10. Jiang Tao et al. Electromigration reliability of tungsten aluminum vias and improvements under AC current stress // IEEE transactions on electron devices, August 1993, vol. 40, no. 8, pp. 1398-1405.
11. Kazuyoshi Kamoshida Electromigration performance of AlCu/Ti and AlCu/Ti/TiN/Ti metallization // J. Vac. Sci. Technology, Nov/Dec 2001, B 19(6), pp. 2190-2194.
12. Donald S. Gardner et al. Layered and homogeneous films of aluminum and aluminum/silicon with titanium and tungsten for multilevel interconnects // IEEE Journal of Solid-State Circuits, February 1985, vol. SC-20, no. 1, pp. 94-103.
13. Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology and Applications. – Second Edition by Hugh O. Pierson. – Norwich, New York, 1998.
14. Тонкие плёнки. Взаимная диффузия и реакции [Thin films. Interdiffusion and reactions]. Moscow, Mir Publ., 1982, 575 pp.
15. Fumitoto Matsuoka et al. Electromigration reliability for a tungsten-filled via hole structure // IEEE transactions on electron devices, March 1990, vol. 37, no. 3, pp. 562-568.
16. Stefan Dreiner et al. High temperature 0.35 micron SOI CMOS process (250 °C and beyond) // Proc. International Conference HiTEN, July 2015, Cambridge, UK.