

УДК 621.382.822

ЛОКАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ АНОДИРОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

А.И. ВОРОБЬЕВА, В.А. СОКОЛ, В.М. ПАРКУН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 9 января 2003

Рассмотрен метод локального электрохимического анодирования, позволяющий уменьшить искажение размера тонкопленочных структур при переносе изображения до 10–15 %. Получены алюминиевые дорожки с квазианизотропным профилем, имеющие импеданс $50 \pm 5 \Omega$ и степень планаризации 95 %.

Ключевые слова: анодирование, алюминиевая дорожка, профиль, межсоединения.

Введение

Последние успехи в микроэлектронике в основном связаны с уменьшением размеров элементов в ИС. При этом за последние 10 лет характерная толщина функциональных слоев, в частности полупроводниковых и металлических, почти не изменилась, а горизонтальные размеры структур сократились с 4–5 мкм до 1–2 мкм и менее. Предельные возможности литографических методов обусловлены также и уходом горизонтального размера элемента при травлении. Сегоднешний технологический уход размеров завтра окажется соизмеримым с размером самого элемента 0,2–0,4 мкм. Поэтому разработка новых методов переноса изображения является очень перспективным научным направлением. К таким методам относится локальное пористое анодирование, которое используется при формировании многоуровневых систем межсоединений (МСМ) [1]. Кроме супермалых размеров дорожек такая металлизация обладает высокой планарностью поверхности функциональных слоев. Степень планаризации для пленок алюминия толщиной 1 мкм достигает 60–80 %. Максимальная степень планаризации была получена при двукратном нанесении слоев алюминия толщиной 1–2 мкм на диэлектрическую подложку и составляет 95 % [2].

Локальное электрохимическое анодирование (ЭХА) является серьезной альтернативой жидкостному химическому травлению и в связи с тем, что позволяет получить энергетически выгодные планарные структуры с вертикальными контактными переходами [2].

Однако анализ отечественной и зарубежной литературы [3, 4] и собственные экспериментальные результаты [5] показали, что электрохимическое анодирование сокращает размеры элементов в слоях алюминия из-за горизонтального поданоирования и чувствительности резиста к внутренним напряжениям, возникающим в результате объемного роста оксида. То есть при переносе рисунка в пленку методом обычного ЭХА возникают боковые искажения размеров, по ширине соизмеримые с глубиной анодирования. В первом приближении жидкостное анодирование изотропно и сопровождается уходом края профиля анодирования на 1–2 мкм при толщине пленок Al 2–3 мкм. Обычно воспроизводимость размеров элементов при анодировании партии образцов составляет ± 1 мкм. Окончание процесса ЭХА фиксируется процентным снижением тока (по времени). Поэтому при одновременном анодировании нескольких подложек в

мени). Поэтому при одновременном анодировании нескольких подложек в установках промышленного типа структуры обычно переанодированы.

Кроме того, при анодировании тонких пленок на диэлектрической подложке серьезными препятствиями для получения хорошей изоляции между дорожками являются эффект близости (аналогичный тому, который возникает при локальном химическом травлении близко расположенных дорожек) и отсечка потенциала на завершающей стадии процесса формирования межуровневой изоляции даже при достаточном расстоянии между дорожками [6].

Целью данной работы является исследование локального пористого анодирования тонких пленок алюминия применительно к технологии изготовления МСМ на диэлектрической подложке. Определены оптимальные условия анодирования и маскирования для получения почти вертикального профиля дорожек с импедансом 50 Ω .

Методика

Экспериментальное изучение поданоирования проводили на тестовых структурах, представляющих собой набор дорожек разной ширины и конфигурации с различным расстоянием между ними. Дорожки изготавливали из тонких пленок алюминия толщиной 1–3 мкм, осажденных методом электронно-лучевого испарения на ситалловые подложки в установке 01НЭ-7-004 "Оратория-9". Пленки осаждали из мишени А-995 (0,005% примесей) в вакууме 5×10^{-4} Па при температуре подложек 420 ± 10 К со скоростью 150 ± 10 нм/мин. Такой режим позволяет получать блестящие, поликристаллические пленки с размером зерен порядка толщины слоев. Пленки Та, используемые в качестве подслоя и маски, осаждали в той же установке в едином вакуумном цикле при температуре подложек 500 ± 10 К со скоростью 10 ± 2 нм/мин.

Анодирование проводили в полуавтоматической установке промышленного типа, рассчитанной на одновременную обработку четырех пластин [7]. Использовали порообразующие электролиты промышленного типа: 3,6%-ный водный раствор щавелевой кислоты (I) и 4%-ный водный раствор ортофосфорной кислоты (II). Тестовые структуры формировали в каждом из электролитов при постоянном формирующем напряжении (потенциостатический режим) и в комбинированном режиме: сначала в 3,6%-ном водном растворе щавелевой кислоты, затем в 4,0 %-ном водном растворе ортофосфорной кислоты. Как показали предварительные исследования, пористый анодный оксид алюминия (ПАОА), сформированный в такой последовательности, имеет наилучшие изоляционные свойства. Параметры процессов анодирования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры процессов анодирования при изготовлении тестовых структур

Режим	Тип электролита	Напряжение формовки, В	Температура электролита, К	Время анодирования, мин
Комбинированный	I	45	297	7
	II	60–90*	293	28
Потенциостатический	I	45	297	20
	II	80	293	50

Фоторезистивную маску изготавливали методом обычной оптической литографии, используя позитивный фоторезист ФП-4-04, наиболее пригодный для гальванических процессов. Танталовую маску формировали методом плазменного травления пленки Та по фоторезистивной маске. Маску из плотного оксида Al_2O_3 изготавливали анодированием пленки Al в буферном (нерастворяющем) электролите типа 1,0%-ного водного раствора лимонной кислоты по фоторезистивной маске при напряжении формовки 120–150 В.

Степень планаризации слоев исследовали методом профилометрии с помощью сканирующего профилометра "Sloan Dektak 3030 Rev". Профили дорожек изучали методом FIB (Field Ion Bombardment) на оборудовании Израильского исследовательского центра ИТН (Israeli Test House, Migdal Haemek) в рамках договора о научном сотрудничестве между БГУИР (г. Минск) и фирмой PCB (г. Хайфа, Израиль).

* Напряжение формовки увеличивали от 60 до 90 В через каждые 7 мин на 10 В.

Результаты и их обсуждение

От формы профиля и площади поперечного сечения дорожки зависят проводимость металлической полоски и импеданс. Сравнение профилей анодирования пленок алюминия толщиной 3 мкм без подслоя и с подслоем Та (50 ± 5) нм, полученных в различных режимах, приводится на рис.1.

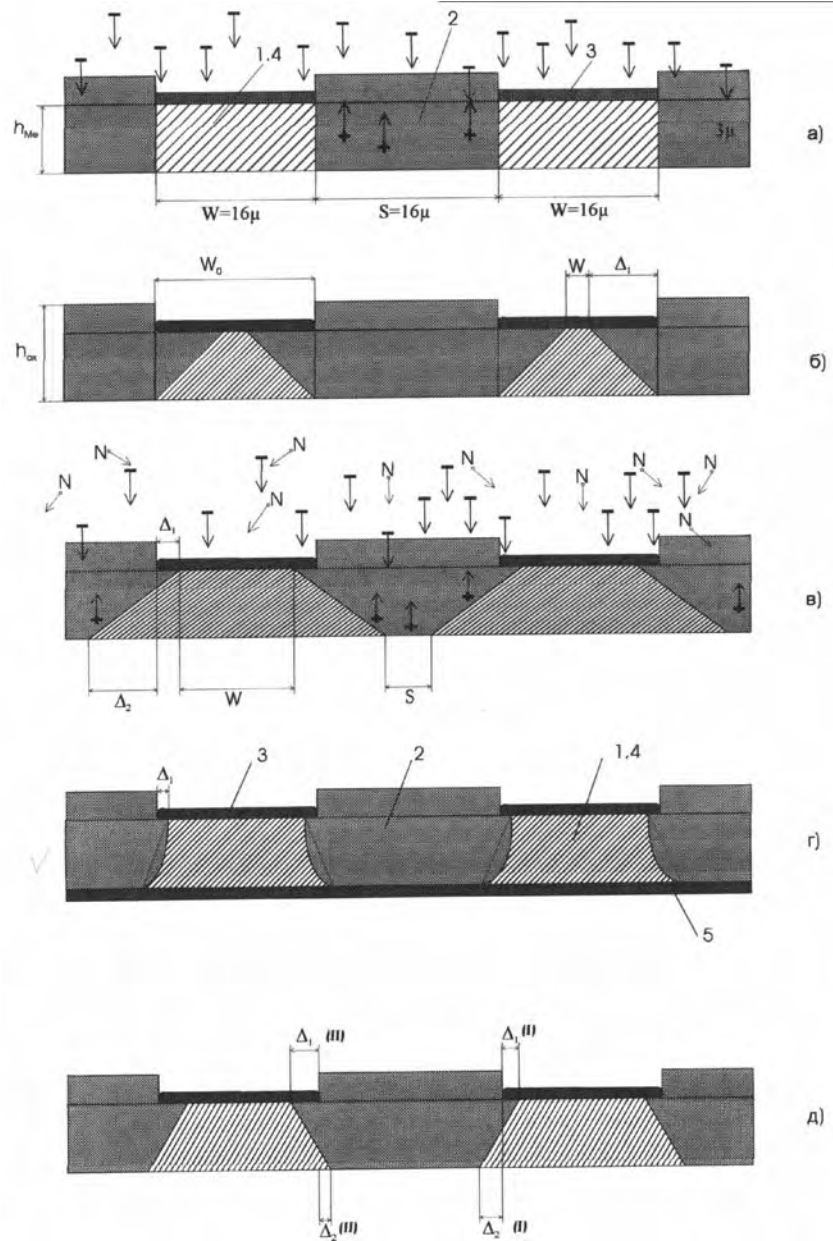


Рис.1. Сравнение профилей анодирования пленок алюминия без подслоя и с подслоем тантала: *a* — идеальный профиль; *b* — предполагаемый изотропный профиль; *в* — экспериментальный профиль без подслоя; *г* — экспериментальный профиль с подслоем: 1 — Al дорожка; 2 — межкомпонентный диэлектрик (пористый Al_2O_3); 3 — маска; 4 — дорожка или контактный переход; 5 — подслоем Та

На этом рисунке схематически показано отклонение экспериментального профиля дорожек (*в*, *г*) от идеального (*a*) и предполагаемого (*b*). Точнее, идеальным является профиль с круглым (что в тонкопленочном варианте технологически невозможно) или квадратным сечением дорожки [8]. Предполагаемый профиль строился исходя из предположений об изотропном характере процесса локального ЭХА с величиной поданодрования Δ_1 , равной толщине пленки Al (наи-

худший случай). Такой профиль получается при локальном химическом травлении пленок алюминия [6].

Экспериментальные профили были построены на основании анализа оптических микрофотографий (рис. 2) и FIB-профилей фрагментов тестовых структур.

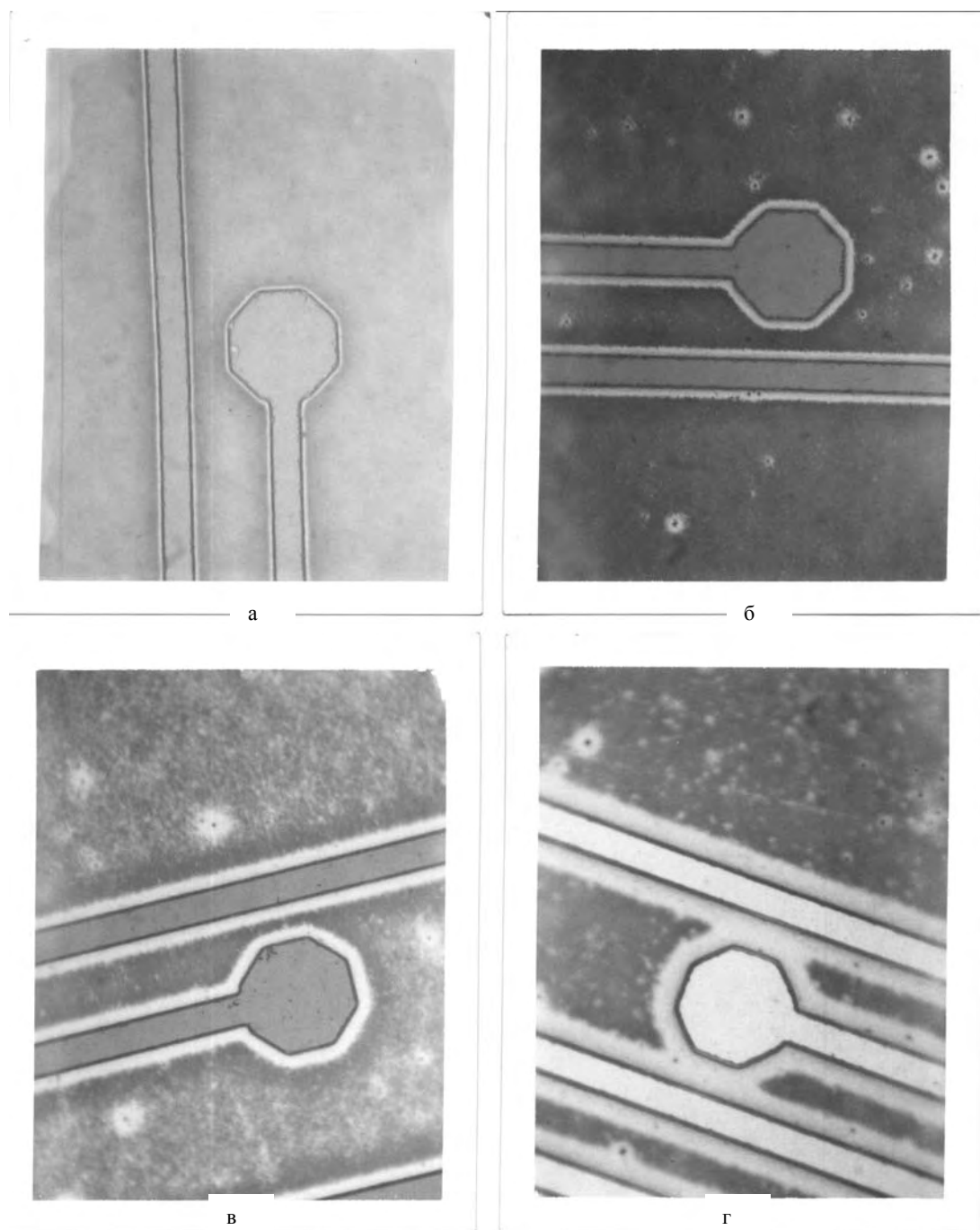


Рис. 2. Оптические микрофотографии дорожек, изготовленных локальным пористым ЭХА пленок алюминия толщиной 3 мкм через танталовую маску в различных режимах: *а* — с подслоем Та, $t_{\Sigma}=65$ мин в комбинированном режиме; *б* — без подслоя, $t_{\Sigma}=65$ мин в комбинированном режиме; *в* — без подслоя, $t_{\Sigma}=50$ мин в комбинированном режиме; *г* — без подслоя, $t_{\Sigma}=20$ мин в потенциостатическом режиме (в электролите типа I)

На рис. 2 показаны оптические микрофотографии (МФ) поверхности проводящих дорожек (1) шириной 16 мкм и шагом (2) 32 мкм, в том числе с контактными переходами (4), полученных локальным ЭХА пленок Al толщиной 3 мкм через танталовую маску (3) толщиной 100 нм в различных режимах. В табл. 2 приведены основные сведения о характере реальных профилей и значения параметров Δ_1 и Δ_2 в зависимости от условий электрохимической обработки. Критическим размером при переносе изображения является минимальное расстояние между элементами в схеме, обозначенное на рис. 2 буквой S. Для наглядности расстояние между дорожками на рис. 1 сделано равным минимальному размеру S, так как именно в этом месте возникают "закоротки" при неполном (несквозном) анодировании слоя алюминия на диэлектрической подложке, как видно из рис. 2,з.

Таблица 2. Основные сведения о характере профилей дорожек в зависимости от условий электрохимической обработки

Тип структуры Ta-Al-Ta и толщина слоев, мкм	Время электрохимической полировки оксида t_n , мин	Суммарное время электрохимической обработки $t = t_a^* + t_n$, мин	Средняя ширина дорожки (вид сверху) W, мкм	Минимальное расстояние в схеме S, мкм	Подано-дирование (по МФ) Δ_1 , мкм	Ширина окантовки Δ_2 , мкм	Коэффициент объемного роста, k	Погрешность изображения, ** Δ , %
Al(3,0)-Ta(0,1)	15	50	14,5	4,0	0,5–1,0	5,5–6,5	1,35	10
Al(3,0)-Ta(0,1)	30	65	14,5	7,7	0,8–1,2	4,0–5,0	1,35	12,5
Al(3,0)-Ta(0,1)	65	100	14,5	9,5	0,5–1,0	3,0–3,5	1,35	10
Ta(0,05)-Al(3,0)-Ta(0,1)	10	45	14,5	15,5	0,5–1,0	1,2–1,5	1,4	10
Ta(0,05)-Al(3,0)-Ta(0,1)	30	65	14,5	14,0	0,5–1,0	0,5–1,0	1,4	10
Ta(0,05)-Al(3,0)-Ta(0,1)	60	95	14,0	15,5	1,0–1,5	0–0,5	1,4	15

Ширина проводящей дорожки W на поверхности на всех МФ почти одинакова и соответствует размеру танталовой маски W_0 минус удвоенная величина подано-дирования под маску ($2\Delta_1$ — ширина темной окантовки). Ширина светлой окантовки около дорожек и контактных переходов Δ_2 (недоано-дированный Al) зависит от времени анодирования и от наличия подслоя. Подчистка этих остатков Al путем увеличения времени анодирования (рис. 2,б,в) при отсутствии подслоя приводит к переано-дированию боковых стенок формируемой структуры. К наибольшему искажению профиля и даже к смыканию дорожек приводит анодирование без подслоя в электролите на основе щавелевой кислоты, рис. 2,з. Это приводит к короткому замыканию в схеме или плохой межкомпонентной изоляции из-за остатков непроано-дированного алюминия. Наилучшие результаты получены при анодировании в комбинированном режиме с подслоем Ta, рис. 2,а. Профиль в этом случае имеет почти вертикальные стенки (штриховые линии на рис. 1,з). Расчетное значение полного сопротивления (импеданса) дорожки с геометрическими размерами и профилем, показанным на рис. 1, з сплошными линиями, равно $50 \pm 5 \Omega$.

На рис. 3 приведен FIB-профиль фрагмента тестовой структуры, представляющий собой машинную распечатку ионного сканирования структуры по глубине (срез). Интересующая область поверхности образца определялась (выбиралась) под микроскопом. Для сокращения времени обработки экспериментальных результатов и, следовательно, стоимости исследований FIB-анализ проводили на образцах меньшей толщины ($h_{Me}=2$ мкм).

* t_a — время анодирования.

** $\Delta = (2\Delta_1/W_0) 100\%$, где $W_0=16$ мкм.

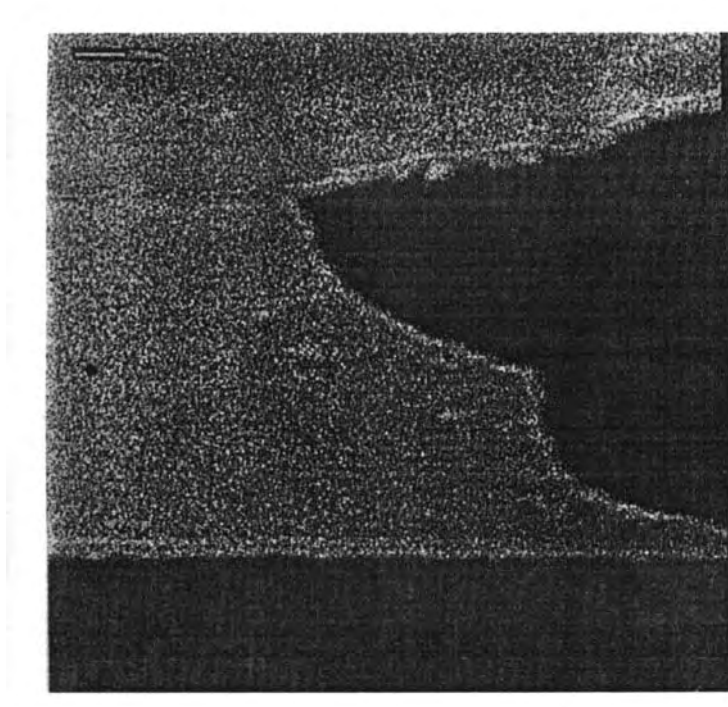


Рис. 3. FIB – профиль фрагмента тестовой структуры

Совместное изучение МФ и FIB-профилей позволило построить зависимости параметров профиля от условий анодирования, приведенные на рис.4.

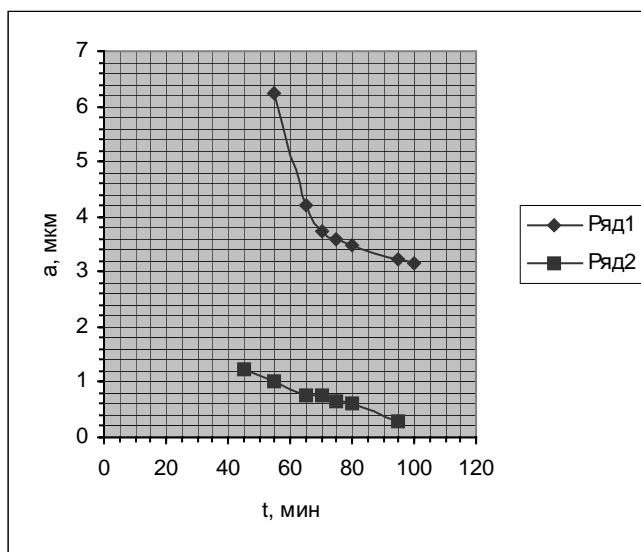


Рис.4. Зависимость параметров профиля от условий анодирования: 1 — без подслоя (Al-Ta); 2 — с подслоем (Ta-Al-Ta)

Из представленных в табл. 2 и на рис. 4 экспериментальных данных видно, что для образцов без подслоя, полученных в комбинированном режиме, ширина схемного элемента увеличивается почти на удвоенную толщину проанодированного слоя, в основном за счет Δ_2 . Величина поданоирования Δ_1 слабо зависит от времени анодирования и почти не зависит от наличия подслоя (табл. 2). Величина Δ_2 , напротив, сильно зависит от наличия подслоя и от времени анодирования (зависимости 1, 2). Аналогичные результаты, полученные при анодировании в каждом из электролитов (I,II), позволили построить профили, показанные на рис. 1,д, из которых видно, что $\Delta_1(\text{II}) > \Delta_2(\text{II})$, $\Delta_1(\text{I}) < \Delta_2(\text{I})$ и $\Delta_1(\text{I}) < \Delta_1(\text{II})$, $\Delta_2(\text{I}) > \Delta_2(\text{II})$.

При анодировании в электролите на основе щавелевой кислоты поданоодирование под маску незначительно, ($\Delta_1(I) < \Delta_2(I)$), однако остаются островки непроаноодированного Al. При анодировании в электролите на основе ортофосфорной кислоты поданоодирование под маску больше, чем в первом случае, $\Delta_1(II) > \Delta_1(I)$, но изоляция между дорожками значительно лучше, так как $\Delta_1(II) > \Delta_2(II)$ и $\Delta_2(II) < \Delta_2(I)$. Поэтому использовали комбинированный режим: половину или 2/3 пленки Al анодировали сначала в первом электролите (тип I), а оставшуюся часть пленки — во втором электролите (тип II).

Таким образом, экспериментальные результаты показывают, что при анодировании в комбинированном режиме структуры Ta–Al–Ta (подслой–основной металл–маска) образуются дорожки с почти вертикальным (квазианизотропным) профилем (рис. 1,з), в котором Δ_1 почти в три раза меньше толщины пленки алюминия.

В первом приближении, не рассматривая вертикально упорядоченные поры в ПАОА, процесс локального ЭХА является потенциально анизотропным, так как ионы металла (+) и электролита (–) движутся направленно, а не хаотично, как показано на схеме рис. 1,а. Реакции в электролите протекают при низких температурах (комнатных) и низких концентрациях ионов, поэтому их скорость определяется диффузией ионов электролита и металла к границам раздела Oх (оксид)–Э (электролит) и Me (металл)–Oх [9]. Изотропное анодирование должно происходить неупорядоченно, с одинаковой скоростью по всем пространственным направлениям, формируя трапециевидный (изотропный) профиль дорожек, показанный на рис. 1,б ($\Delta_1 \approx h_{Me}$). Сильное электрическое поле ($E > 10^7$ В/см) между электродами упорядочивает движение ионов и ускоряет процесс. Продукты диссоциации и электролиза бомбардируют образец в первую очередь по нормали к поверхности, рис. 1,а,в. Возможно и неупорядоченное движение нейтральных частиц (молекул электролита) из-за перемешивания к боковым поверхностям пленки при подъеме маски (N на рис. 1,в). Чем тоньше маска и чем слабее ее адгезия к поверхности пленки, тем больше зона поданоодирования Δ_1 .

В качестве примера на рис. 3 приведен клювообразный профиль поданоодирования в области контакта с маской, который показывает, что поданоодирование происходит в основном в результате подъема тонкой маски. Поэтому величина Δ_1 почти не зависит от условий анодирования и наличия подслоя, а определяется параметрами маскирования.

При наличии подслоя Ta фронт пористого анодирования пленки Al является почти планарным. На конечной стадии этого процесса потенциал продолжает подаваться через подслоя, удельное сопротивление которого много меньше, чем удельное сопротивление оставшейся островковой пленки алюминия. После полного (сквозного) анодирования пленки алюминия начинается анодирование пленки тантала через сквозные поры по механизму барьерного анодирования. Одновременно происходит электрохимическая полировка сформированного анодного оксида [10]. Механизм анодирования пленки Ta через пористый оксид Al_2O_3 подробно описан ранее в ряде публикаций [11, 12], поэтому в данной статье не рассматривается. Предложенное объяснение экспериментальных результатов характеризует процесс локального ЭХА как квазианизотропный, так как поданоодирование под маску незначительно, а искажение профиля дорожки обусловлено в основном величиной Δ_2 .

Величина поданоодирования Δ_1 на МФ меньше, чем на FIB-профилях. Это связано с тем, что через непрозрачную танталовую маску не видны клювообразные участки. Но даже с учетом этих участков Δ_1 составляет примерно 0,3 от h_{Ox} , что в три раза меньше чем при травлении. Полное изменение размера дорожки составляет 10–15%.

Основными физическими причинами сильного поданоодирования могут быть неподготовленная поверхность пленки Al (плохая адгезия резиста), неоптимальная температура отжига резиста и объемный рост оксида. Для улучшения адгезии фоторезистивной маски в производственном процессе такие материалы, как свежесаженный Al и его оксиды, должны быть немедленно обработаны или защищены покрытием (маской) в сухих условиях, чтобы избежать адсорбции воды при хранении. Поэтому перед нанесением фоторезиста проводили предварительную обработку образцов в хромовой смеси и сушку при температуре 393 К в течение 10 мин. Как вариант можно рекомендовать также обработку в парах изопропилового спирта.

Так как коэффициенты термического расширения позитивных ДНХ резистов $(2-5) \cdot 10^{-5}$ см/град и пленки Al $(2-3) \cdot 10^{-5}$ см/град соизмеримы по величине, нагрев или охлаждение не приводят к дополнительным напряжениям и отслаиванию маски. Однако операции сушки и задубливания фоторезистивной маски должны быть экспериментально изучены для каждого конкретного случая (тип поверхности, тип фоторезиста, влажность и т.д.). Сушку используемого фоторезиста проводили при температуре 373 К, а задубливание — поэтапно с постепенным повышением температуры до 453 К.

Более вертикальные профили при прочих равных условиях были получены при использовании маски из пленки Ta или Al₂O₃, полученной непосредственно из пленки Al анодированием в буферном электролите.

У тонких защитных пленок (Ta- и Al₂O₃-маски) при хорошей адгезии подъем края маски происходит без отрыва от поверхности пленки Al в результате объемного роста оксида. Этот подъем приводит к искривлению профиля дорожки, и тем больше, чем тоньше маска. Большая скорость роста оксида (в растворе щавелевой кислоты) приводит к формированию клювообразного профиля (рис. 3) вследствие быстрого подъема края тонкой металлической маски ($h_{Ta}=160$ нм; $h_{Al}=2000$ нм; $h_{Al}/h_{Ta}=12$). Аналогичный эффект наблюдается при изотропном травлении алюминия, если соотношение толщин пленки и маски больше 4 [6]. Маску из Ta называем металлической условно, так как в процессе анодирования алюминия часть пленки Ta также анодируется и маска становится двухслойной (Ta-Ta₂O₅), большей толщины (160 нм).

Объемный рост оксида является неотъемлемым свойством процесса анодного окисления и связан с фазовым превращением Al в анодную оксидную пленку (АОП). Причиной возникающих механических напряжений в результате объемного роста является затруднение свободного удлинения за счет наличия жесткой механической связи оксида с Al.

При допущении образования компактной, негидратированной* окиси алюминия на основании равенства числа грамм-атомов окисляемого Al числу грамм-атомов образующегося оксида, можно написать уравнение для единицы анодированной поверхности:

$$b \cdot d_{Al}/M_{Al} = h \cdot d_{ox}/M_{ox}, \quad (1)$$

где d_{Al} , d_{ox} — удельный вес Al ($2,7$ г/см³) и Al₂O₃ ($2,78-3,12$ г/см³) [13]; M_{Al} — атомный вес алюминия (27); M_{ox} — эквивалентный вес оксида (51), т.е. вес оксида, приходящегося на один атом Al (102:2).

Из уравнения (1) определим коэффициент объемного роста k , равный отношению h к b :

$$h/b = (d_{Al} \cdot M_{ox}) / (d_{ox} \cdot M_{Al}) = 0,1 M_{ox}/d_{ox},$$

$$h/b = k = 1,83-1,65.$$

Это расчетное значение, не учитывающее растворение оксида в процессе анодирования. Экспериментальные величины, полученные по профилограммам поверхности и FIB-профилям тестовых образцов, приведены в табл. 2.

Степень планаризации одного уровня межсоединений при толщине слоя алюминия, равной 2 мкм, определенная по тем же профилограммам поверхности, составляет 90–95 %.

Исследования тестовых структур показали, что разрешение линий при анодировании (S) зависит в первую очередь от параметров самого процесса анодирования, и в меньшей степени от разрешения маски (металлической или фоторезистивной), см. рис. 2. От типа маски зависит форма профиля и горизонтальные размеры самой дорожки. Наименьшее отклонение от заданных размеров было достигнуто для пленок алюминия толщиной 2,0 мкм на подслое Ta толщиной 50 ± 5 нм при анодировании в комбинированном режиме через комбинированную маску — "пленка Ta+фоторезист".

В большинстве процессов полупроводниковой технологии допускается искажение размеров структур при переносе изображения на уровне 30 %. При локальном ЭХА этот параметр составляет 10–15 % и основная проблема связана с обеспечением токоподвода при завершении процесса формирования межкомпонентной изоляции. Несколько конструктивно-технологических вариантов обеспечения токоподвода при формировании МСМ на диэлектрической подложке опи-

*Гидратация оксидных пленок толщиной <16 мкм незначительна, т.е. стехиометрический состав оксида соответствует формуле Al₂O₃, в отличие от гидратированной окиси алюминия Al₂O₃·n H₂O [14].

саны в работах [1, 2] и позволяют изготавливать микронные дорожки 1–2 мкм с шагом $S \geq (2,0-2,5) h_{Me}$.

Заключение

Формирование планарной МСМ с вертикальными контактными переходами и прямоугольным профилем дорожек методом анодирования является серьезной альтернативой плазменному и тем более химическому травлению. Этот метод значительно дешевле, проще, не требует дорогостоящего оборудования и специально обученного персонала. Метод локального ЭХА является экологически чистым, энергетически выгодным, легко управляемым и контролируемым.

Показано, что локальное пористое анодирование алюминия на диэлектрической подложке носит квазианизотропный характер ($\Delta_1 < h_{Me}$), а искажение профиля анодирования обусловлено, в основном, отсечкой потенциала ($\Delta_2 \sim h_{Me}$).

Комплексные исследования процесса локального ЭХА показали, что при анодировании пленок алюминия с подслоем тантала в комбинированном режиме формируются дорожки с почти вертикальным (прямоугольным) профилем. Разработаны методы маскирования и определены оптимальные условия анодирования, позволяющие уменьшить искажение размера структур при переносе изображения с 30 до 10–15 %. Разработаны методы обеспечения токоподвода при проведении сквозного локального ЭХА на диэлектрической подложке, позволяющие изготовить дорожки микронной ширины на слоях алюминия, толщиной 1–2 мкм. Уменьшение толщины металлического слоя позволит в перспективе получить субмикронные дорожки.

Получены алюминиевые дорожки с квазианизотропным профилем, имеющие импеданс $50 \pm 5 \Omega$ и степень планаризации 90–95 %.

LOCAL ELECTROCHEMICAL ANODIZATION FOR MAKING MULTILEVEL INTERCONNECTION SYSTEMS

V.A. SOKOL, A.I. VOROBIOVA, V.M. PARKUN

Abstract

The method of local electrochemical anodization, permitting to reduce the skew of the thin-film structures sizes during patterning up to 10–15 % is considered. The aluminium lines with quasi-anisotropic lateral profile having an impedance about $50 \pm 5 \Omega$ and surface planarity extent of 95 % are obtained.

Литература

1. *Labunov V.A., Sokol V.A., Vorobiova A.I., Parkun V.M.* Process for Making Multilevel Interconnection of Electronic Components. Pat. USA № 5580825, 30.03.95.
2. *Воробьева А.И., Москвичев К.В.* // Микроэлектроника. 2000. Т.29. №6. С.417–425.
3. *Сурганов В., Мозалев А.* // Зарубежная электронная техника. 1993. №1–2. С.40–55.
4. *Schwartz G.C., Platter V.* // J.Electrochem. Soc. 1976. Vol.123. P.34–37.
5. *Сокол В.А., Воробьева А.И.* // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2001. (в печати).
6. *Моро У.* Микролитография. В 2 ч. Пер. с англ. М. 1990.
7. *Чукаев С.В., Короткевич А.В., Михайлов Д.Н., Радионов А.А.* // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. "Новые технологии изготовления многокристалльных модулей". Минск (Нарочь). 2000. С.191–194.
8. *Дорфман В.Д., Иванов Л.В.* ЭВМ и ее элементы. Развитие и оптимизация. М. 1988.
9. *Tompson G. E., Xu Y., Skeldon P.* // Philosophical Magazine B. 1987. Vol.55. №6. P.651–667.
10. *Сокол В., Панченко Е., Воробьева А., Пинаева М.* // Электрохимия. 1987. Т.23 №12. С.1664–1667.
11. *Воробьева А.И.* // Микроэлектроника. 2001. Т.30, №6. С.360–373.
12. *Vorobyova A.I., Outkina E.A.* // Thin Solid Films. 1998. Vol.324. P.1–10.
13. *Юнг Л.* Анодные окисные пленки. Л., 1967.
14. *Томашев Н.Д., Тюкина М.Н., Заливалов Р.* Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов. М., 1968.