

УДК 621.382

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ В ДИСПЛЕЙНЫХ МЭМС НА ОСНОВЕ АЛЮМООКСИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

А.С. ТЫМОЩИК, А.Г. ЧЕРНЫХ, С.А. ВОЛЧЕК

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

Поступила в редакцию 5 апреля 2011

В работе рассматриваются вопросы повышения надежности омических контактов металлических слоев к мелкозалегающим $p-n$ -переходам при высокой интеграции дисплейных оптических МЭМС-элементов, изготавливаемых по алюмооксидной технологии с управляющей схемой на едином кристалле. Показано, что добавки редкоземельных металлов, в частности гольмия, в кремнийсодержащие пленки алюминия оказывают на них модифицирующее действие. Введение редкоземельных металлов резко снижает вероятность образования ямок травления, делая возможным создание контактов к мелкозалегающим $p-n$ -переходам с малыми размерами контактного окна.

Ключевые слова: алюмооксидная технология, сплавы алюминия, редкоземельные металлы, микродисплейные устройства, омический контакт.

Введение

Основой алюмооксидной МЭМС технологии является использование тонких пленок алюминия и его анодных окислов в качестве рабочих и жертвенных слоев соответственно. Использование алюминия в качестве основы структурных слоев МЭМС-приборов делает возможным интеграцию механических систем с управляющей электроникой на едином кристалле в едином производственном цикле.

С целью анализа и изучения особенностей процесса взаимодействия кремниевых слоев и тонкой пленки алюминия на границе раздела при создании омических и механических контактов проведены теоретический расчет и экспериментальная оценка глубины растворенного кремния в области контакта в зависимости от различных технологических факторов. Рассмотрен механизм твердофазного растворения кремния в алюминии при тепловой обработке, изучено модифицирующее влияние редкоземельных металлов на характер взаимодействия тонкой пленки алюминия с кремниевыми слоями.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Согласно диаграмме фазового состояния (рис. 1) [1] алюминий и кремний не образуют силицидов. Единственно возможными физическими процессами при тепловой обработке контактной системы Al – Si ниже температуры эвтектики (577 °C) ввиду близости радиусов иона Al^{3+} (0,51) и иона Si^{4+} (0,42) являются процессы взаимной диффузии. В результате взаимной диффузии должны происходить процессы твердотельного растворения алюминия в кремнии и кремния в алюминии. Однако, поскольку растворимость алюминия в кремнии мала, процессом растворения алюминия в кремнии можно пренебречь. По оценке авторов [2] процесс растворения алюминия в кремнии медленнее растворения кремния в алюминии в 100 раз. Следовательно, при тепловой обработке контактной системы Al – Si происходит преимущественное растворение кремния и при температуре эвтектики образуется твердый раствор, характеризующийся предельным содержанием кремния в алюминии 1,59 ат. % или 1,65 вес. %.

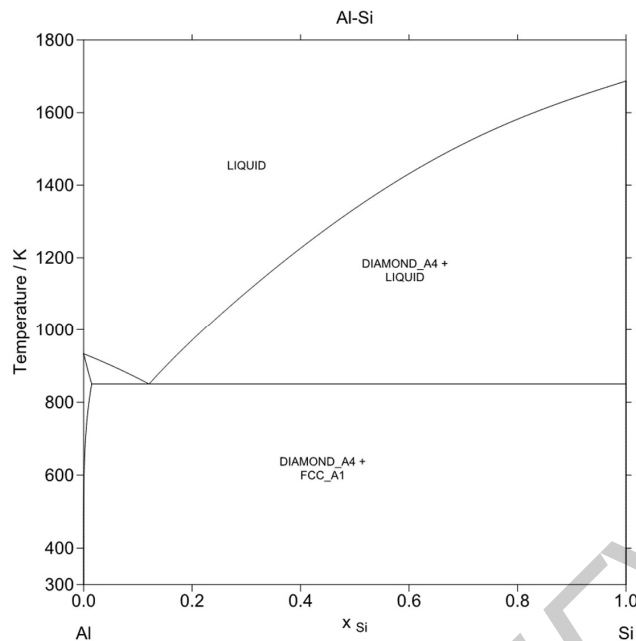


Рис. 1. Диаграмма фазовых состояний системы Al – Si

Диффузия в тонких пленках алюминия происходит в основном по границам зерен, а проникновение кремния в пленку усиливается за счет их поликристаллической структуры. Коэффициент диффузии кремния в алюминии определяет глубину проникновения кремния в объем пленки алюминия в процессе тепловой обработки. Рассчитанная диффузионная длина кремния в алюминии для типовых режимов отжига (475, 510 °C) составляет не менее 30 мкм. Это значительно превышает технологическую толщину используемых пленок алюминия и, следовательно, слой алюминия окажется насыщенным кремнием на всю толщину. Проблема осложняется тем, что растворение Si в области контакта происходит не по всей площади контакта, а локально, образуя характерные ямки травления, типичная картина которых представлена на рис. 2.

Растворимость кремния в алюминии при наибольшей температуре отжига 510 оС, согласно диаграмме фазового состояния, составит 0,85 ат.%. Удельные плотности алюминия (ρ_{SiAl}) и кремния (ρ_{Si}) равны 2,74 г/см³ и 2,33 г/см³ [3] соответственно. Таким образом, для контакта при толщине пленки алюминия, равной 1 мкм, величина глубины растворения кремниевой подложки (Z_{Si}) составит 0,01 мкм.

Рассчитанная величина справедлива для случая равномерного растворения кремния по площади контакта. Однако в реальных условиях растворение кремния в области контакта носит анизотропный характер. Размеры ямок травления колеблются в широких пределах, от 0,2 мкм до 3 мкм, максимальная глубина ямок травления достигает 0,5 мкм, плотность – $10^6 - 10^7$ см⁻².

Одной из причин образования локальных ямок травления на поверхности кремниевой подложки может быть преимущественное растворение кремния в местах кристаллографических дефектов кремния. Для экспериментального подтверждения связи ямок травления со структурными дефектами подложки последние, после удаления алюминиевой металлизации, подвергались травлению в структурно чувствительном травителе Райта [4]. В результате наблюдаемая плотность фигур травления, обусловленная структурными дефектами кремния, оказывались всегда ниже (на несколько порядков) плотности ямок травления, образованных твердофазным растворением кремния в алюминии. Следовательно, структурные дефекты кремния не являются определяющим фактором, влияющим на распределение изучаемых ямок травления.

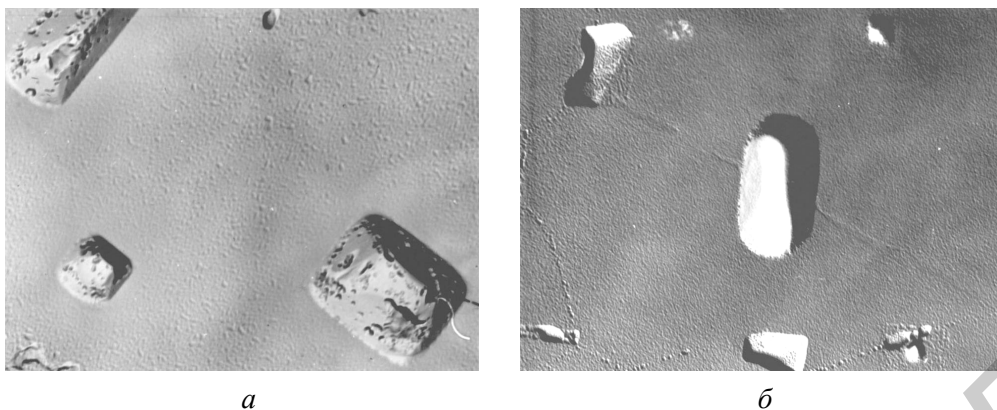


Рис. 2. Морфология ямок травления кремниевой подложки в контактной системе Al – Si при отжиге 570 °С (а) и 475 °С (б)

Важным фактором, оказывающим влияние на характер взаимодействия алюминия и кремния, может быть состояние границы раздела, связанное с наличием барьерного оксидного слоя толщиной 1-3 нм, всегда присутствующего на поверхности кремниевой подложки. При термическом отжиге алюминий взаимодействует сначала с барьерным оксидным слоем. При этом справедлива следующая химическая реакция.



Учитывая, что взаимодействие алюминия и диоксида кремния носит экзотермический характер [5], на этом участке становится возможным локальное повышение температуры и, как следствие, более интенсивное растворение кремния. Поскольку коэффициент диффузии атомов кремния по границам зерен тонкой пленки алюминия достаточно высокий, то растворенный в алюминии кремний быстро диффундирует по пленке, заполняя не только область пленки над участками взаимодействия алюминия с кремниевой подложкой, но и прилегающие к ним области тонкой пленки. К тому времени, когда алюминий провзаимодействует с оксидным слоем на оставшихся участках контакта, тонкая пленка алюминия над этими участками будет уже частично насыщена кремнием, а значит, на этом участке процесс растворения кремния в алюминии будет не столь интенсивным. Это способствует тому, что кремний растворяется в алюминии по площади контакта неравномерно, образуя локальные ямки травления, формирование которых определяется кристаллографическими особенностями кремниевой подложки.

В ходе выполнения работ было показано, что введение добавок редкоземельных металлов, в частности гольмия (0,8 масс. %), в тонкие пленки алюминия приводит к уменьшению геометрических размеров ямок травления в кремниевой подложке при одновременном увеличении их плотности. Этот факт подтверждает рассмотренную выше теоретическую модель образования омического контакта Al – Si.

В самом деле, добавка редкоземельных металлов, обладая повышенной химической активностью [5], частично связывает неконтролируемые примеси в барьерном слое SiO₂ и тем самым способствуют более равномерному взаимодействию тонкой пленки алюминия с кремниевой подложкой по всей площади контакта. В результате растворение кремниевой подложки начинается практически одновременно на многих участках контакта. А поскольку общее количество растворенного кремния остается прежним, то увеличение очагов взаимодействия пленки алюминия с кремниевой подложкой приводит к увеличению плотности ямок травления и уменьшению их геометрических размеров, что и наблюдается экспериментально.

При изготовлении дисплейных элементов МЭМС существует необходимость формирования контактных окон различных размеров и конфигураций. Рассмотрим зависимость интенсивности процессов растворения кремния от размеров контактного окна.

Во всех вышеприведенных исследованиях пленка металла полностью покрывала всю поверхности образца, а размер ямок травления соответствовал экстремальному случаю растворения кремния в бесконечном слое алюминия. Реальные приборы имеют тонкопленочные проводящие дорожки конечной ширины и контактные окна конечных размеров, для которых результат взаимодействия алюминия и кремния может сильно зависеть от их топологических размеров.

В первом приближении для случая одномерной диффузии глубина перемещения границ раздела Al – Si вследствие растворения кремниевой подложки в области контактного окна может быть оценена следующим образом:

За время отжига (t_0) контакта площадью (S), образованной алюминиевой дорожкой, характеризующейся шириной (a) и толщиной (d), кремний распространится приблизительно на расстояние $(Dt_0)^{1/2}$ от контактного окна, где D – коэффициент диффузии кремния при заданной температуре отжига.

Если это расстояние больше размеров контактного окна, то объем (V_{Al}) пленки алюминия с растворенным в нем кремнием определяется как

$$V_{Al} = 2\sqrt{Dt_0} \cdot a \cdot d. \quad (1)$$

Масса пленки алюминия с растворенным кремнием составит:

$$m_{Al} = \rho_{Al} \cdot V_{Al}, \quad (2)$$

где ρ_{Al} – плотность алюминия.

Масса кремния, растворенного в этом объеме алюминия, будет равна:

$$m_{Si} = \alpha_{Si} \cdot m_{Al}, \quad (3)$$

где α_{Si} – растворимость кремния в алюминии при заданной температуре отжига.

Или, подставляя выражение (2):

$$m_{Si} = \alpha_{Si} \cdot \rho_{Al} \cdot V_{Al}. \quad (4)$$

Тогда объем кремния, растворенного на границе раздела, равен:

$$V_{Si} = \frac{m_{Si}}{\rho_{Si}} = V_{Al} \cdot \alpha_{Si} \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Si}}. \quad (5)$$

Глубина перемещения (X_{Si}) границы раздела, вследствие растворения кремния в области контакта, определится из выражения

$$X_{Si} = \frac{V_{Si}}{S}, \quad (6)$$

где S – площадь контактного окна.

Подставляя последовательно выражение (1) и (5), получим конечное выражение для оценки X_{Si} :

$$X_{Si} = \frac{V_{Al}}{S} \alpha_{Si} \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Si}} = \frac{2\sqrt{Dt_0} \cdot a \cdot d}{S} \alpha_{Si} \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Si}}, \quad (7)$$

где D – коэффициент диффузии кремния в алюминии при заданной температуре отжига; d – толщина слоя алюминия; a – ширина алюминиевой дорожки; α_{Si} – растворимость кремния в алюминии при заданной температуре отжига; S – площадь контакта; ρ_{Al} , ρ_{Si} – удельная плотность алюминия и кремния соответственно.

Анализ результатов теоретически рассчитанных значений глубины перемещения (X_{Si}) границы раздела Al – Si вследствие растворения кремния при температуре отжига 475 °С в зависимости от продолжительности отжига, размеров контактного окна и ширины алюминиевой дорожки (при толщине слоя алюминия 0,7 мкм) свидетельствуют о весьма сильной зависимости интенсивности процессов растворения кремния от размеров контактного окна, особенно для окон малых размеров.

Экспериментальные исследования изменения морфологии поверхности кремниевой подложки в области контактного окна также свидетельствуют об интенсивном растворении кремния при тепловой обработке, при этом анизотропный характер растворения кремния оказывается еще более ярко выраженным в сравнении с вышерассмотренным случаем контакта по всей площади пластины кремния.

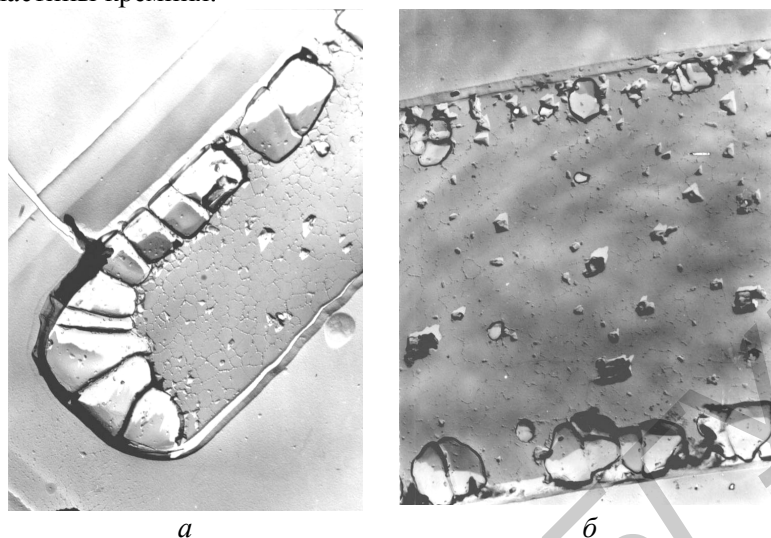


Рис. 3. Ямки травления на поверхности кремния в области контакта $T_{\text{отж}}=475\text{ }^{\circ}\text{C}$: *a* – Al; *б* – Al+0,8%Но

Характерно, что образование ямок происходит преимущественно по периферии окна (рис. 3,*a*). Изменение конфигурации контактного окна от квадратного к прямоугольному за счет увеличения одной из сторон не приводит к заметным изменениям в характере взаимодействия алюминия и кремния и определяющим фактором по-прежнему остается образование ямок по краю контактного окна.

Преимущественное растворение кремния по периферии контактного окна может быть обусловлено, с одной стороны, повышением напряжений по краю окна, что может вызвать увеличение скорости растворения на этих участках, с другой стороны – возрастанием роли экзотермического характера реакции Al и SiO_2 в условиях избытка диоксида кремния на краю контактного окна. Известно, что в результате сильной экзотермической реакции между алюминием и диоксидом кремния освобождается энергия порядка 220 МДж на 1 кмоль реагирующего диоксида кремния. Это, в свою очередь, может приводить на участках с избыточным количеством диоксида кремния (т.е. на краю контактного окна) к образованию локальных очагов с температурой, превышающей температуру проведения отжига, и способствовать активному растворению кремния по периферии контактного окна.

Экспериментально установлено, что для случая контакта размерами 6х6 мкм, образованного тонкой пленкой алюминия при температуре отжига 475 0С в течение 15 минут, площадь, занятая ямками травления, составляет 30% от всей площади контакта.

Максимальные размеры ямок в основании составляют 2–3 мкм, медианное значение глубины равно 0,65 мкм, а глубина отдельных ямок достигает 0,80 мкм. Отсюда очевидно, что экспериментально установленная глубина ямок травления (0,65–0,80 мкм) значительно превышает рассчитанную величину глубины растворения кремния (0,10 мкм) для тех же условий отжига и размеров контактных окон. В то же время теоретическая (0,012 мкм) и экспериментальная (0,016 мкм) оценки количества растворенного кремния отличаются незначительно.

Из этого следует, что необходимое для насыщения алюминиевых дорожек количество кремния локально удаляется из очагов предпочтительного растворения кремния в области контакта, в силу рассмотренных выше особенностей взаимодействия алюминия и барьерного оксидного слоя на границе раздела.

Введение в пленки алюминия добавок гольмия (0,8% масс. %) оказывает модифицирующее действие на состояние границы раздела, способствуя более равномерному зарождению ямок по всему периметру окна (рис. 3,*б*). При этом максимальные размеры ямок в основании уменьшаются до 1,5–2,0 мкм, а глубина их не превышает 0,5 мкм. Такой характер распределения ямок травления в кремниевой подложке при образовании омического контакта тонкой

пленкой алюминия, содержащей добавки гольмия, представляет собой меньшую угрозу для отказов за счет короткого замыкания расположенных близко к поверхности кремниевой подложки $p-n$ переходов и снижения механической прочности механических структур на основе слоев Si – Al.

Заключение

Результаты проведенных исследований показали, что добавка в алюминиевую металлизацию редкоземельных металлов, в частности гольмия, оказывают модифицирующее действие на состояние межфазной границы раздела кремниевая подложка – металлическая пленка при тепловой обработке. Это проявляется, во-первых, в уменьшении глубины и размеров ямок травления, образующихся в результате твердофазного растворения кремния в области контакта, для сплава Al+Ho в сравнении с монометаллической пленкой алюминия; во вторых, в уменьшении плотности и размеров микроструктур, обусловленных преципитатами кремния в области контакта, для сплава Al+Ho+Si в сравнении со сплавами Al+Si. Сплав алюминия с редкоземельными металлами повышает надежность омических контактов металлических слоев к мелкозалегающим $p-n$ -переходам при высокой интеграции дисплейных оптических МЭМС-элементов, изготавливаемых по алюмооксидной технологии.

METHODS OF INCREASING OF OHMIC CONTACTS RELIABILITY FOR DISPLAYS MEMS ON A BASIS OF ALUMINUM – OXIDE TECHNOLOGY

S.A. VOLCHEK, A.S. TYMOSHCHIK, A.G. CHERNYKH

Abstract

Methods of increasing of metal layers to $p-n$ -junction ohmic contacts reliability in MEMS displays are considered. It was proved that adding of Ho modifies Al – Si metal films. Insertion of Ho reduces the probability of etch pit formation, making it possible to build contacts to thin $p-n$ -junction.

Литература

1. *Иванов В.Н.* Словарь-справочник по литейному производству. М., 1990.
2. *Wetzig K., Schneider C.M.* // WILEY-VCH GmbH&Co. 2003. С. 391.
3. *Syd R Wilson, Clarence J. Tracy, John L.* // Noyes Publications. 1993. С. 892.
4. *Черных А.Г., Павлюковец С.А., Ригольд С.В.* // Современные средства связи. 2007.С. 56-58.
5. *Morinaga H., Suyama M., Ohmi T.* // Electrochem. Soc. 1994. Vol. 141. P. 2834–2841.