

**М.И. Черных¹, В.А. Фиронов², А.Н. Цоцорин³,
В.А. Кожевников³, В.И. Дикарев³**

¹ ФГБОУ ВПО «Воронежский Государственный Университет»

² ФГБОУ ВПО «Воронежская Государственная Лесотехническая Академия»

³ ОАО «Научно-исследовательский институт электронной техники»

Оценка надежности различных типов многослойной металлизации при воздействии высоких температур

Проведено сравнение различных систем многослойной металлизации с адгезионным слоем на основе Ti. Тестовые структуры для температурных испытаний отжигали в диффузионной печи на воздухе при температурах 400 – 600°C, периодически контролируя сопротивления дорожек и их внешний вид. Проводились испытания по наработке на отказ при температуре 400-600°C. Наибольшую из рассчитанных энергию активации деградации, равную 4,8 (± 0,1) эВ, имеет металлизация с барьерным слоем на основе TiN.

Ключевые слова: металлизация, термическая стабильность

По мере развития твердотельной электроники на основе широкозонных полупроводников, таких как карбид кремния и нитрид галлия, исследователи сообщали, что работа элементной базы, созданной с применением данных материалов, возможна в диапазоне температур вплоть до 600°C [1, 2]. Однако негативные процессы в металлизации прибора могут происходить уже при температуре 300°C [3, 4]. В связи с этим возникает проблема термической стабильности металлизации кристаллов. Для решения данной проблемы рядом авторов представлены различные виды многослойных систем металлизации, содержащих в общем случае три основных слоя: адгезионный, барьерный и защитный. [5].

В качестве основных видов деградации многослойной металлизации при длительной высокотемпературной и термоцикловой нагрузке обычно выделяют следующие:

1. Потеря адгезии металлизации;
2. Образование интерметаллических соединений между слоями металлизации;
3. Проплавление барьерного слоя.

Для определения проплавления барьерного слоя металлизации в качестве материала подложки выбран монокристаллический кремний. При взаимодействии с токопроводящим слоем золота кремний образует эвтектическое соединение кремний-золото, наличие которого может детектироваться по изменению цвета металлизации [9], что свидетельствует о проплавлении барьерного слоя.

С целью изучения надёжности различных систем металлизации проводились испытания при термической нагрузке тестовых структур двух типов. Первый тип представляет собой металлизированные дорожки, расположенные на диэлектрическом слое оксида кремния. Тестовые структуры второго типа имеют вид металлизированных контактов большого периметра (100x500 мкм), перекрывающих контактные окна к кремнию. Назначение структур второго типа - определение устойчивости металлизации к проплавлению. Момент проплавления определяли по характерному изменению цвета и

рельефа поверхности площадок, что прямо указывало на взаимодействие золота с кремнием с образованием эвтектики.

Тестовые структуры для температурных испытаний отжигали в диффузионной печи на воздухе при температурах 400 – 600°C, проводя периодический контроль сопротивления дорожек и их внешнего вида. Отжиг проводился синхронно на двух типах тестов.

В работе проведены испытания следующих типов металлизации:

Ti (0,2мкм) – Pt (0,2мкм) – Au;

Ti (0,2мкм) – Pt (0,4мкм) – Au;

Ti (0,15мкм) – TiN (0,05мкм) – Pt (0,2мкм) – Au;

Ti:W (0,3мкм) – Ti (0,1мкм) – Pt (500А)– Au.

Толщина слоя золота для резистивных дорожек составляла 0,3 – 1,0 мкм, а для контактов к кремнию - 1 мкм, толщина адгезионного и барьерных слоёв на обоих типах тестов не имела отличий, и слои наносились в едином технологическом процессе. Перед началом испытаний был проведён отжиг всех образцов при 500°C в течение 10 мин.

При температуре 400°C за 50 часов не произошло заметного изменения таких параметров образцов, как величина сопротивления R, цвет металлизации, рельеф поверхности, целостность контактов. Сопротивление дорожек тестовых структур после отжига на воздухе при 400°C показано на рисунке 1

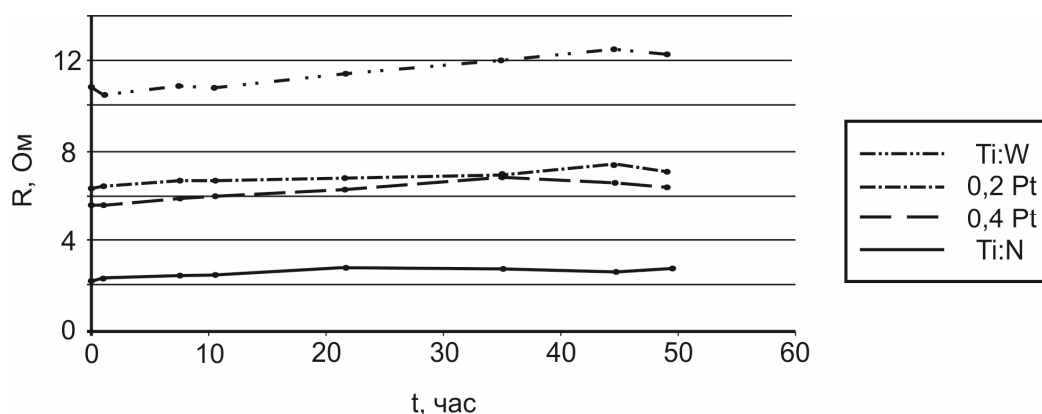


Рисунок 1

После увеличения температуры до 450°C за первые 50 часов испытаний имел место рост сопротивления дорожек на 50-60% (барьер Pt и Ti:W) и в 5 раз (барьер TiN), в дальнейшем зависимости приняли пологий характер. Внешний вид металлизации претерпел умеренные изменения. Остальные параметры сохраняли стабильность. В связи со стабилизацией параметров структур, испытания были прекращены после 100 часов.

С повышением температуры до 500°C и выше наблюдался заметный рост (в 3-4 раза) сопротивления дорожек для всех типов металлизации. На рисунке 2 литерой «А» отмечены точки, которые соответствовали моменту проплавления площадок Pt (0,2 мкм) – Au (1,0 мкм), контактировавших с кремнием. Для образцов с барьерным слоем Ti:W рост сопротивления носил монотонный характер вплоть до отказа (отмечен литерой «Б»), который обусловлен отслоением металлизации на дорожках. Сопротивление дорожек тестовых структур после отжига на воздухе при 600°C показано на рисунке 2.

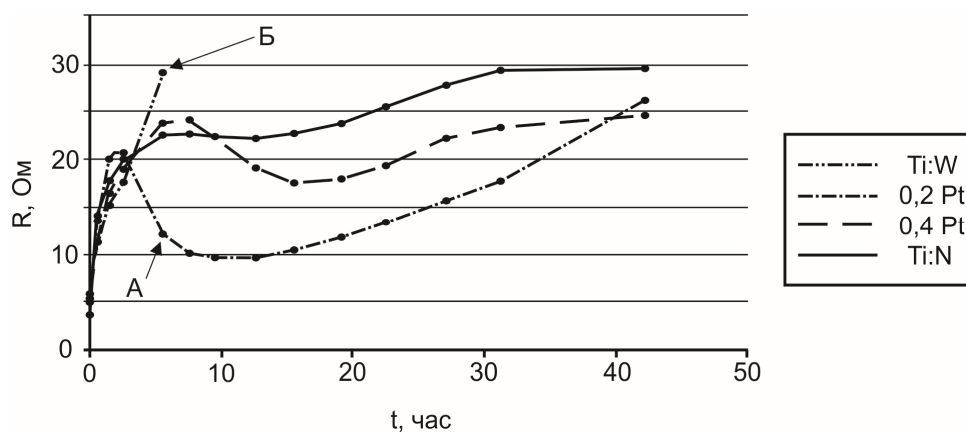


Рисунок 2

На металлизированных контактах с барьерным слоем Ti:W наблюдалось отслоение краёв, сопровождаемое заворачиванием металлического слоя, но к полному отслоению площадок это не приводило, из-за их большой площади. Тем не менее, образцы были признаны отказавшими через 143 часа по причине отслоения металлизации по периметру площадок.

Следует отметить, что проплавление металлизации с барьерным слоем Ti:W не наступило даже при температуре 600°C (только 3,5 % структур отказало после 12,5 часов). Контакты Ti – Pt (0,2мкм) – Au (1мкм) отказали в результате проплавления через 520 часов (отказ 50% структур). Вопреки ожиданиям, введение подслоя Ti в металлизации Ti:W (0,3мкм) – Ti (0,1мкм) – Pt (500Å) – Au не привело к заметному повышению адгезии и надёжности: прибавка по времени до отказа при 500°C составила всего 40 часов. Механизм отказа идентичный – заворачивание краёв площадок из-за окисления вольфрама.

Контакты Ti– Pt (0,2мкм) – Au (1мкм) отказали в результате проплавления после отжига на открытом воздухе при 550°C через 50 часов. На соответствующей кривой виден перегиб, что, очевидно, указывает на утрату барьерным слоем платины своей защитной роли и начало взаимодействия нижнего титана со слоем золота.

На всех металлизированных дорожках после отжига при 600°C после 20 часов наблюдался значительный рост сопротивления, который связан с окислением адгезионных слоёв Ti, TiN, Ti:W. Это было обнаружено из наблюдений за внешним видом дорожек при помощи оптического микроскопа: края дорожек и контактных площадок имеют серый цвет, в то время как центральная часть сохраняет желтый цвет золота. Краевое окисление также имеет место при более низких температурах, однако оно не столь явно выражено. Поэтому для решения вопросов долговременной стабильности необходимо предусмотреть в конструкции систем металлизации, рассчитанных на высокие температуры эксплуатации, пассивирующие слои.

На втором этапе исследования был поставлен эксперимент по наработке различных типов структур на отказ в диапазоне температур 400-600°C. При эксплуатации при 400°C все типы металлизации прошли испытания в течении 520 часов без существенных замечаний. При наработке на отказ при температуре среды 500°C до конца испытаний без

отказов прошли два типа металлизации, содержащих барьерный слой TiN и 0,4 мкм Pt. У группы образцов с барьерным слоем 0,2 мкм Pt к концу испытаний отказало порядка половины структур из-за проплавления барьерного слоя. Металлизация с барьерным слоем Ti:W отказала после 180 часов работы, в качестве главной причины отказов установлено заворачивание краев дорожек металлизации.

При температуре 550°C у порядка 20% образцов с барьерным слоем 0,4 мкм Pt после 250 часов испытаний наблюдалось проплавление металлизации, остальная часть образцов проработала 330 часов без отказов. Барьерный слой TiN показал себя несколько лучше, чем барьерный слой на основе 0,4 мкм Pt: в первый час проплавилось порядка 5% структур, остальные проработали 330 часов без отказов. При данной температуре барьерный слой 0,2 мкм Pt полностью проплавлялся за 40 часов наработки. У металлизации с барьерным слоем Ti:W после 35 часов испытаний отмечено отслоение краев с образованием в них сквозных дыр.

При температуре 600°C порядка половины образцов с барьерным слоем 0,4 мкм Pt отказали после 5 часов испытаний, в свою очередь все образцы с барьерным слоем 0,2 мкм Pt отказали на 4 час работы. В обоих случаях причиной отказов было отмечено проплавление барьерного слоя. Для металлизации с барьерным слоем Ti:W было отмечено отслоение краев после 10 часов наработки. Образцы с барьерным слоем TiN отказывали после 20 часов наработки, при этом внешний вид металлизации характеризовался бугристостью и сильным потемнением.

Данные полученные при наработке на отказ были использованы для расчета энергии активации деградации металлизации и времени наработки на отказ при температуре 300°C описанной в [10]. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Металлизация	Энергия активации деградации, эВ	Расчетная наработка на отказ при 300°C, час	Причина отказа
0,15 Ti–0,05 TiN–0,2 Pt–1,0 Au	4,8 ($\pm 0,1$)	$1,8 \times 10^{13}$	Проплавление барьерного слоя
0,2 Ti–0,4 Pt–1,0 Au	4,6 ($\pm 0,1$)	$8,1 \times 10^{12}$	Проплавление барьерного слоя
0,2 Ti–0,2 Pt–1,0 Au	3,0 ($\pm 0,1$)	$1,4 \times 10^9$	Проплавление барьерного слоя
0,3 TiW–0,1 Ti–500Å Pt–1,0 Au	1,4 ($\pm 0,1$)	$2,9 \times 10^5$	Отслоение металлизации по краям обкладок

В статье рассмотрены различные виды металлизации для микроэлектронных устройств, рассчитанных на повышенные температуры эксплуатации. Полученные экспериментальные данные и расчеты на их основе показывают, что наилучшую наработку на отказ пересчитанную на 300°C, равную $5,4 \times 10^9$ лет, имеет металлизация с барьерным слоем на основе TiN. Немного худшие показатели имеет металлизация с барьерным слоем 4 мкм Pt – $9,2 \times 10^8$ лет. Уменьшение толщины барьерного слоя Pt до 2 мкм уменьшает время наработки на отказ более чем на 3 порядка до $1,6 \times 10^5$ лет. Для всех

упомянутых видов металлизации основной причиной отказа является проплавление барьерного слоя. Для металлизации с контактными слоями TiW, расчетная наработка на отказ при 300°C составила 33 года, причиной отказа является отслоение обкладок металлизации. Все рассмотренные типы металлизации обеспечивают необходимую надежность приборов, учитывая, что жизненный цикл изделий микроэлектронной промышленности обычно не превышает 25 лет. При этом выбор конкретного типа металлизации определяется технологическими возможностями производства и конструктивными особенностями микроэлектронных приборов. Стоит отметить, что реальные значения наработки на отказ рассмотренных многослойных металлизаций могут быть значительно ниже приведенных - из-за явлений электромиграции (массопереноса), которые в данной статье не рассматривались.

Библиографический список

1. High Temperature Electronics, Communications, And Supporting Technologies For Venus Missions, G. W. Hunter, R. S. Okojie, P. G. Neudeck, G. M. Beheim, G. E. Ponchak, G. Fralick, J. Wrbanek, M. Kraskowski, D. Spry, and L.-Y. Chen, NASA Glenn Research Center, 2006
2. Maier, D., Alomari, M. ; Grandjean, Nicolas ; Carlin, J.-F. ; Diforte-Poisson, M.-A. ; Dua, C. ; Chuvilin, A. ; Troadec, D. ; Gaquière, C. ; Kaiser, U. ; Delage, S.L. ; Kohn, E. Testing the Temperature Limits of GaN-Based HEMT Devices // Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on (Volume:10 , Issue: 4) p. 427 – 436, 2010
3. Harmon, G. Wire Bonding in Microelectronics: Materials, Processes, Reliability and Yield, 2nd ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1997
4. Chwee Sim Goh, Wee Ling Eddy Chong, Teck Kheng Lee and Christopher Breach. Corrosion Study and Intermetallics Formation in Gold and Copper Wire Bonding in Microelectronics Packaging // Crystals 2013, 3, 391-40
5. Громов Д.Г., Мочалов А.И., Сулимин А.Д., Шевяков В.И., Металлизация ультрабольших интегральных схем // Бином. Лаборатория знаний, 277 стр, 2011
6. A Sozza, C Duab, A Kerlainb, C Brylinskib, E Zanon, Long-term reliability of Ti–Pt–Au metallization system for Schottky contact and first-level metallization on SiC MESFET // Microelectronics Reliability Vol. 44, Issue 7, 2004, P. 1109–1113
7. Qi Zhang, Robert Dormaier, Transmission Electron Microscopy of TiW/Ti/Pt/Au Gate Metallizations for InAs // Cambridge journals 2007
8. and Devices for Sensing, Imaging, and Solar Energy, 84191H (October 15, 2012); doi:10.1117/12.974293
9. Carl E Hoge., Thomas S., Some Considerations of the Gold-Silicon Die Bond Based on Surface Chemical Analysis // Reliability Physics Symposium, 1980, p 301 – 311
10. ОСТ 11 336.938-83 Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность (Приложение б)