УДК 621.3.049

ЭЛЕКТРОМИГРАЦИЯ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ СО СКВОЗНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

[1]Черкесова Н.В.*, [1]Мустафаев Г.А., [2]Мустафаев А.Г., [1]Здравомыслов Д.М.

[1]Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
[2]Дагестанский государственный университет народного хозяйства

**natasha07_2002@mail.ru*

Аннотация. *В статье исследуется устойчивость к электромиграции структур со сквозными отверстиями, не заполненными вольфрамом, и влияния на процесс электромиграции заполнения отверстий вольфрамом. Показано, что с уменьшением диаметра отверстия в структурах отверстиями, незаполненными вольфрамом, величина среднего времени отказа снижается вследствие плохого покрытия алюминием и возрастания отношения ширины отверстия к его длине, а в случае заполнения отверстий вольфрамом величина среднего времени отказа от диаметра не зависит. Установлено, что при электромиграции сопротивления сквозного отверстия изменяется из-за действия тока высокой плотности, который вызывает миграцию кремния через алюминий с последующим его осаждением по границе раздела вольфрам-алюминий.*

Ключевые слова: энергия активации, диффузия, электромиграция, металлизация, межуровневый диэлектрик, осаждения, планаризация

ELECTROMIGRATION IN THROUGH-HOLE SOLID-STATE INTEGRATED STRUCTURES

[1]Cherkesova N.V., [1]Mustafaev G.A., [2]Mustafaev A.G., [1]Zdravomyslov D.M.

[1]Kabardino-Balkarian State University
[2]Dagestan State University of National Economy

Abstract. *The paper studies the resistance to electromigration of structures with through holes not filled with tungsten and the effect of filling the holes with tungsten on the electromigration process. It is shown that with a decrease in the hole diameter in structures with holes not filled with tungsten, the mean failure time decreases due to poor aluminum coating and an increase in the ratio of the hole width to its length, and in the case of filling the holes with tungsten, the mean failure time does not depend on the diameter. It is shown that during electromigration, the resistance of the through hole changes due to the effect of high-density current, which causes silicon migration along aluminum with its subsequent deposition along the tungsten-aluminum interface.*

Keywords: activation energy, diffusion, electromigration, metallization, interlevel dielectric, deposition, planarization

Введение

При изготовлении твердотельных интегральных структур с многоуровневой металлизацией одним из «узких мест» в их создании является процесс формирования сквозных отверстий [1–4]. Это обусловлено тем, что уменьшение характеристических размеров приборов приводит к соответствующему снижению размеров сквозных отверстий, и для них отношение ширины к длине становится большим. Это, в свою очередь, сопровождается такими нежелательными эффектами, как ухудшение качества планаризации верхнего диэлектрического слоя, образование пустот в диэлектрике, а также плохое покрытие ступеньки у края сквозного отверстия, что затрудняет получение хорошего контакта и сннижает надежность схем [5–8].

Результаты и обсуждение

Для изучения устойчивости к электромиграции стандартных структур со сквозными отверстиями, не заполненными вольфрамом, и влияния на процесс электромиграции заполнения отверстий вольфрамом изготавливали тестовые образцы [9, 10]. Для этого на кремниевую подложку методом химического осаждения из паровой фазы (ХОПФ) наносили слой SiO_2 (толщиной 0,3 мкм), а затем напыляли первый уровень металлизации (Al-1 % Si) толщиной 0,8 мкм.

Перед формированием второго уровня металлизации того же состава (1 мкм) с помощью ХОПФ-метода, стимулированного плазмой, наносили межуровневый диэлектрик SiO_2 с последующей планаризацией фоторезистом общей толщиной 1,2 мкм. Второй уровень металлизации не пассивировали, чтобы уменьшить вводимые напряжениями эффекты в процессе испытаний на электромиграцию. Сквозные отверстия, изготовленные реактивным ионным травлением, полностью заполнили вольфрамом, используя ХОПФ-метод из смеси WF_6 и SiH_4 (для сравнения, в некоторых образцах были открытые отверстия), что позволило получить очень гладкую поверхность. Ширина линий металлизации, соединяющих прилегающие отверстия в цепи, выбрана равной 6 мкм, так чтобы средняя плотность тока для алюминиевых полосок составила менее трети по сравнению с плотностью тока для площади сквозного отверстия.

При исследовании электромиграции средне время отказа оценивалось как время, в течение которого отказывало 50 % образцов выходили изистроя. Для ускорения, испытания проводили при высокой плотности тока, в результате чего образец нагревался джоулевым теплом. Чтобы определить истинную температуру, при которой проходили испытания, сначала строили калибровочную зависимость *сопротивление-температура*, измеряя сопротивление цепи при разных температурах и низкой (10^4 А/см^2) плотности тока.

Результаты исследования электромиграции в структурах с отверстиями различного диаметра при плотности тока $1{\times}10^6$ А/см^2 представлены на *рисунках 1* и *2*.

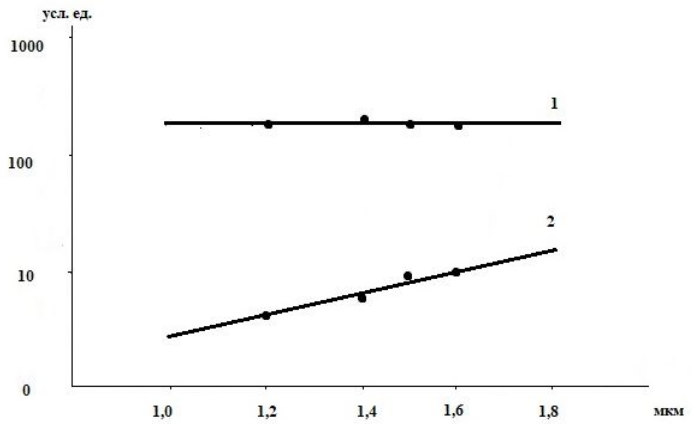

Рисунок 1 – Изменение среднего времени отказа от диаметра отверстия:
1 – в структурах с заполненными отверстиями вольфрамом,
2 – в структурах с незаполненными отверстиями вольфрамом

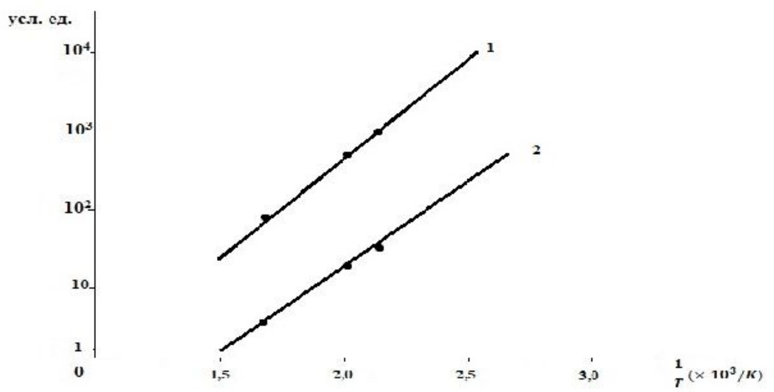

Рисунок 2 – Изменение энергии активации: 1 – структуры с заполненными вольфрамом отверстиями,
2 – в структурах с незаполненными отверстиями вольфрамом

Изучение электромиграции в структурах с отверстиями различного диаметра при плотности тока 1×10^6 А/см^2 и температуре 200 °С показало (*рисунок 1*), что с уменьшением диаметра отверстия в стандартных структурах с незаполненными отверстиями (2) величина среднего времени отказа заметно снижалась вследствие плохого покрытия алюминием и возрастания отношения ширины отверстия к его длине. В случае заполнения отверстий вольфрамом (1) величина среднего времени отказа от диаметра не зависела и, кроме того, была значительно выше, чем для стандартных структур.

Анализ кривых на *рисунке 2* показывает, что стандартные структуры (2) и с отверстиями, заполненными вольфрамом (1) (диаметр отверстий в обоих случаях составляет 1,5 мкм), мало отличаются по энергии активации – 0,55 и 0,62 эВ, соответственно. Если учесть, что энергия активации электроимиграции вольфрама, по расчетам, равна 1,9 эВ, а величина 0,62 эВ укладывается в диапазон значений, соответствующих диффузии алюминия по границам зерен (0,5–0,7 эВ), то можно считать вероятным возникновение отказов именно на участках из алюминия, особенно вблизи отверстий, где может иметь место резкое возрастание тока.

Проведенные расчеты распределения плотности тока в двумерном приближении показали, что в структурах с отверстиями, заполненными вольфрамом, пиковый ток, который имеет место во внутреннем углу границы раздела вольфрам-алюминий, всего в 1,5 раза превышает среднее значение плотности тока, что во много раз меньше, чем для стандартных структур.

Исследования также показали, что в процессе испытаний на электромиграцию происходит изменение сопротивления сквозного отверстия, определяемого делением общего сопротивления цепи на число отверстий. На *рисунке 3* показаны изменения сопротивления отверстия от длительности испытаний при плотности тока 1×10^6 А/см^2.

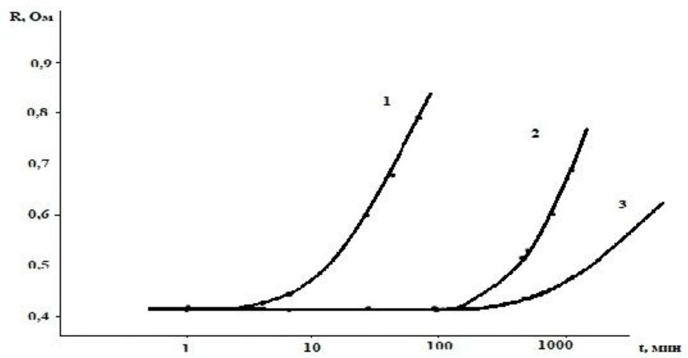

Рисунок 3 – Изменение сопротивления отверстия от длительности испытаний, при температуре: 1 – 300 °С, 2 – 230 °С, 3 – 200 °С

Следует отметить, что в стандартных структурах с такими же отверстиями (диаметром 1,5 мкм) такого изменения сопротивления не наблюдалось даже при более высоких температурах. Для изучения этого явления на образцы, изменившие свое сопротивление в процессе испытаний при 300 °С, подавался тот же ток противоположной полярности. При этом восстанавливалось сопротивление, степень которого зависела от температуры (*рисунок 4*).

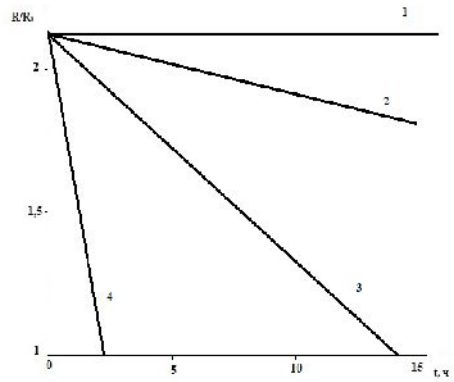

Рисунок 4 – Относительное изменение сопротивление от длительности испытаний при плотности тока 1×10^6 А/см^2, при температуре: 1 – 100 °С, 2 – 230 °С, 3 – 250 °С, 4 – 300 °С

Кривые Аррениуса, построенные по данным *рисунков 3* и *4* (*рисунок 5*, показывают, что энергия активации как процесса увеличения сопротивления (2), так и процесса его восстановления (1) равна 1,1 эВ и соответствует энергии активации диффузии кремния в алюминий.

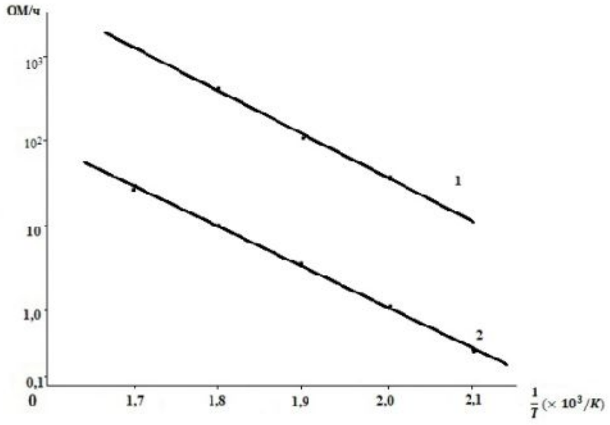

Рисунок 5 – Скорость изменения сопротивления от температуры (Ом/ч)

Это означает, что воздействие тока высокой плотности может вызывать миграцию кремния через алюминий с последующим его осаждением по границе раздела вольфрам-алюминий.

Для проверки этого предположения использовали метод электронной Оже-спектроскопии образцов после проведения испытании на увеличение сопротивления. Примесные профили у поверхности раздела второго уровня металлизации и заполненного вольфрамом сквозного отверстия показывают, что концентрация кремния у поверхности раздела с катодной стороны отверстия более чем вдвое превышает аналогичную величину у поверхности раздела с анодной стороны. Это означает, что атомы кремния, содержащиеся в алюминиевой металлизации, действительно мигрируют под действием приложенного тока и образуют преципитаты у поверхности раздела катодной стороны, заполненного вольфрамом отверстия и второго уровня металлизации.

Можно ожидать, что такой же процесс будет иметь место у поверхности раздела первый уровень металлизации, на анодной стороне заполненного вольфрамом отверстия. Оценки показывают, что изменение сопротивления одиночного отверстия диаметром 1,5 мкм после длительной работы приборов при температуре 125 °С и плотности тока 3×10^5 А/см^2 составит менее 0,05 Ом. Поскольку такая величина пренебрежимо мала для реальных условий эксплуатации прибора, можно считать, что миграция кремния из алюминиевой металлизации не будет оказывать заметного влияния, а технология селективного заполнения сквозных отверстий субмикронных размеров с использованием метода химического осаждения из паровой фазы повышает устойчивость к электромиграции.

Выводы

Проведено исследование устойчивости к электромиграции структур со сквозными отверстиями, не заполненными вольфрамом, и влияния на процесс электромиграции заполнения отверстий вольфрамом. Показано, что с уменьшением диаметра отверстия в структурах с незаполненными вольфрамом отверстиями величина среднего времени отказа снижается вследствие плохого покрытия алюминием и возрастания отношения ширины отверстия к его длине.

Показано, что энергия активации и процесса увеличения сопротивления и процесса его восстановления равна 1,1 эВ, и соответствует энергии активации диффузии кремния в алюминий, а воздействие тока высокой плотности может вызывать миграцию кремния через алюминий с последующим его осаждением по границе раздела вольфрам-алюминий.

Библиография

1. Смолин В.К. Особенности применения алюминиевой металлизации в интегральных схемах // Микроэлектроника. 2004. Т. 33, № 1. С. 10–16.

2. Pietranico S., Lefebvre S., Pommier S., Berkani Bouaroudj M., Bontemps S. A study of the effect of degradation of the aluminium metallization layer in the case of power semiconductor devices // Microelectronics Reliability. 2011. V. 51, N 9-11. P. 1824–1829.

3. Mustafaev G.A., Khasanov A.I., Cherkesova N.V., Mustafaev A.G. Technology for the formation of refractory metals for micro- and nanoelectronics products // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 905. P. 12048.

4. Мустафаев Г.А., Черкесова Н.В. Силициды тугоплавких металлов для изделий микро- и наноэлектроники: учебное пособие. Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2021. 95 с.

5. Мустафаев Г.А., Черкесова Н.В., Мустафаев А.Г. Отказы в межсоединениях интегральных схем, вызванные электромиграцией // Электроника и электротехника. 2017. № 4. С. 1–5.

6. Мустафаев Г.А., Черкесова Н.В., Панченко В.А., Мустафаев А.Г. Надежность интегральных микросхем с алюминиевой металлизацией // Электроника и электротехника. 2017. № 3. С. 1–6.

7. Черкесова Н.В., Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г. Технология формирования контактов из тугоплавких металлов к легированным полупроводниковым слоям // Нано- и микросистемная техника. 2024. Т. 26, № 4. С. 184–187.

8. Wilson T., Korolev K., Crow N. Bilayer lift-off process for aluminum metallization // Journal of Micro/Nanolithography. 2015. V. 14. N 1. P. 014501-1.

9. Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г., Черкесова Н.В., Хасанов А.И. Применение силицида вольфрама как токопроводящего материала для металлизации // Известия Чеченского госуниверситета. 2017. № 4. С. 36–40.

10. Патент РФ № 2757177. Способ изготовления силицидных контактов из вольфрама / Г.А. Мустафаев, А.Г. Мустафаев, Н.В. Черкесова, А.Г. Мустафаев, А.И. Хасанов. Опубликовано: 11.10.2021 г. Бюлл. № 29.