

УДК 681.32

## Формирование трёхмерных токопроводящих микроструктур на поверхности кремния

А.А. ХМЫЛЬ, Н.Н. ФЕДОСЕНКО, А.Н. КУПО

Предложен метод формирования межслойных медных соединений на поверхности кремния в слое фоторезиста, комбинирующий резистивное напыление в вакууме, с последующим электрохимическим осаждением при облучении ультрафиолетовым излучением. Проведены исследования полученных структур методами атомно-силовой микроскопии и электронно-растровой микроскопии. Показано, что полученные межсоединения обладают плотноупакованной структурой и химически однородны, что обуславливает высокие эксплуатационные характеристики.

**Ключевые слова:** микроэлектроника, медные межсоединения, атомно-силовая микроскопия.

The article studies the method of forming copper wiring on the surface of silicon in the photoresist layer, combining the resistive coating in a vacuum, followed by electrochemical deposition under ultraviolet light. The article studies the obtained structures with the help of atomic force microscopy and scanning electron microscopy. It shows that the wiring has packed structure and chemical homogeneity, which leads to high operational features.

**Keywords:** microelectronics, copper wiring, atomic force microscopy.

### *Введение*

Центральное место в современной технологии изготовления изделий электронной техники, в частности, формирования сквозных проводящих каналов (межсоединений), занимает фотолитография. На ее долю приходится более половины производственных затрат [1].

Высоким разрешением обладают поверхностные структуры, сформированные фотолитографическим методом на поверхности кремния, покрытой слоем фоторезиста. Используемые фоторезисты должны обладать высокой чувствительностью к действию излучения, высокой стойкостью к плазмохимическому травлению, малой дефектностью, высокой контрастностью, низкой чувствительностью к изменению параметров фотолитографического процесса (т. е. большой технологической широтой) и т. п. [2]–[5].

В качестве материала для формирования межсоединений элементов интегральных микросхем, как правило, используется электроосаждённая медь, которая имеет низкое сопротивление ( $1,67 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ ), более высокую токонесущую способность, возможность дальнейшего масштабирования (т. е. уменьшения топологических размеров) [6], [7]. Медные микро и нано контакты выдерживают высокие плотности тока, что актуально при переходе к более компактным нанометровым межсоединениям. В связи с этим разработка технологии создания таких межсоединений является актуальной задачей [8].

### *Техника эксперимента*

Получена серия образцов, представляющих собой трёхмерные токопроводящие структуры на поверхности кремниевых пластин. Образцы изготавливались следующим образом: на поверхность кремния методами вакуумной металлизации (резистивное испарение либо магнетронное распыление) наносился проводящий подслой меди, затем на него – слой фоторезиста методом центрифугирования и последующего спекания в муфельной печи при температурах  $90\div 100^\circ\text{C}$ . Полученные образцы подвергались обработке ультрафиолетовым излучением через маску, представляющую собой матрицу периодических структур с различным расстоянием между штрихами (до 10 штрихов на мм). Проявление осуществлялось в 1%-ном растворе гидроксида натрия. После задубливания пленка фоторезиста на поверхности медного подслоя представляла собой чередование периодических структур с различным разрешением, что давало возможность использовать полученные образцы для последующей

электрохимической обработки с целью осаждения меди в пустоты, сформированные в слое фоторезиста. Электроосаждение меди производилось в электролитах двух типов. Один из электролитов представлял собой сернокислый электролит меднения ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$ ), второй – раствор аммиаката меди ( $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4$ ). При этом электрохимическая реакция сопровождалась облучением поверхности катода ультрафиолетовым излучением, что приводило к росту скорости осаждения в 3÷4 раза на подложках, полученных методом резистивного напыления, по сравнению с экспериментами, проводимыми без облучения. Основные этапы описанного процесса представлены на рисунке 1.

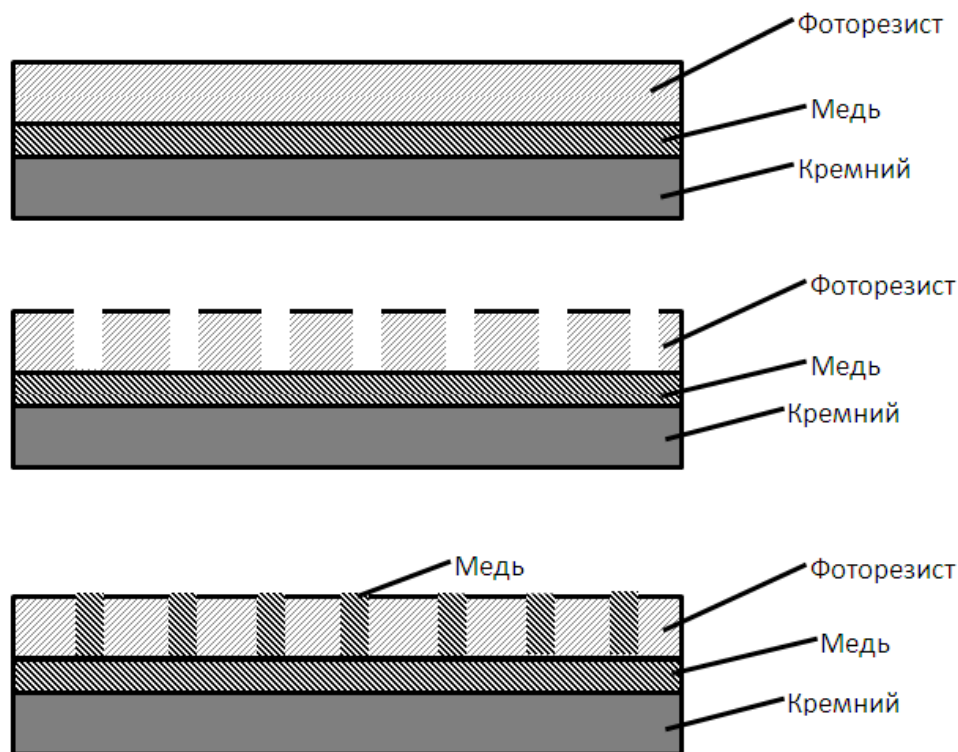


Рисунок 1 – Этапы формирования медных межсоединений в слое фоторезиста

### **Результаты исследования**

Исследования проводились с целью определить, каким образом сказываются на электрических и микромеханических свойствах полученных трехмерных проводящих микроструктур способ формирования токопроводящего подслоя, а также тип электролита и наличие стимулирующего ультрафиолетового излучения, воздействующего на этапе электроосаждения.

Следует отметить, что покрытия, формируемые в вакууме методом магнетронного распыления, по сравнению с резистивным напылением традиционно обладают заметно большей адгезией к подложке и высокой однородностью (практически отсутствуют поверхностные дефекты). Однако, с точки зрения их использования в качестве проводящего подслоя, при последующем электроосаждении уступают покрытиям, полученным резистивным напылением, как раз по причине наличия поверхностных дефектов. Поверхностные дефекты медных плёнок, полученных резистивным напылением, выступают в качестве центров кристаллизации в процессе электрохимического осаждения, тем самым повышается скорость роста осадка, улучшается его адгезия и электропроводящие свойства.

С целью изучения электрических и микромеханических свойств полученных трёхмерных периодических структур были проведены исследования методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ), а также исследования химического состава поверхности.

Исследовались образцы четырёх типов: медный подслоя, сформированный резистивным напылением в вакууме (тип 1) и методом магнетронного распыления (тип 2); медные

межсоединения, осаждённые электрохимическим методом на подслое, сформированном резистивным напылением с использованием стимулирующего ультрафиолетового излучения (тип 3) и без него (тип 4). Медные межсоединения, сформированные на подслое, полученном магнетронным распылением, имели слабую адгезию к материалу подслоя и потому не исследовались. Результаты исследований высоты кристаллитов на поверхности указанных покрытий представлены на рисунке 2.

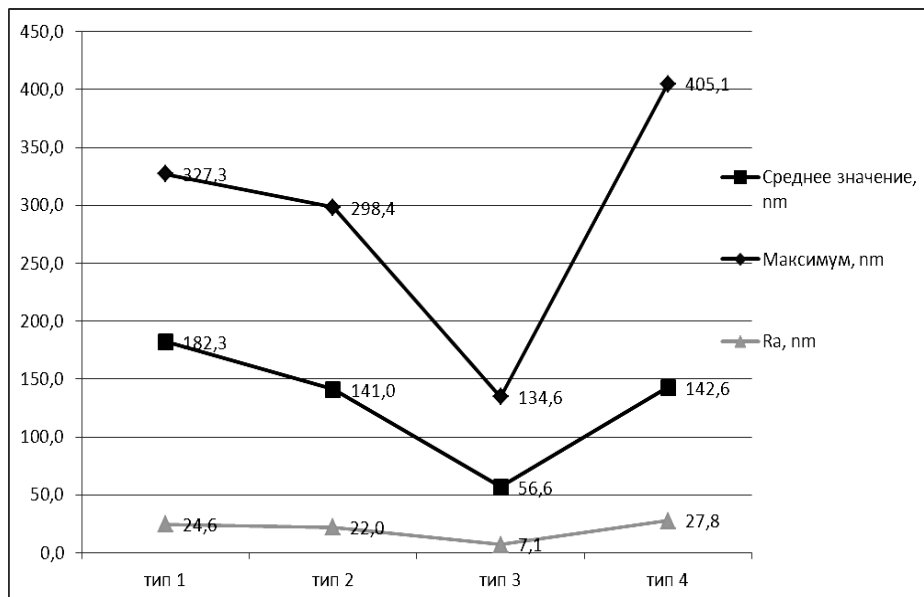


Рисунок 2 – Результаты исследования высоты неровностей методом АСМ

Как видно из диаграммы, представленной на рисунке 2, наименьшую высоту имеют неровности на поверхности образцов типа 3, кроме того, среднеквадратичное отклонение ( $R_a$ ) тоже является наименьшим для образцов указанного типа, что говорит о высокой однородности данного типа покрытия по сравнению с прочими. Кроме того, исследования средней площади поверхности кристаллитов тем же методом указывают (см. рисунок 3) на то, что при сравнительно малой высоте отдельных кристаллитов покрытия типа 3 их площадь в 3÷5 раз превышает площадь зёрен на покрытиях прочих типов, в том числе и покрытиях подслоя. Этот факт указывает на плотноупакованную структуру покрытия, как правило обеспечивающую высокие эксплуатационные характеристики.

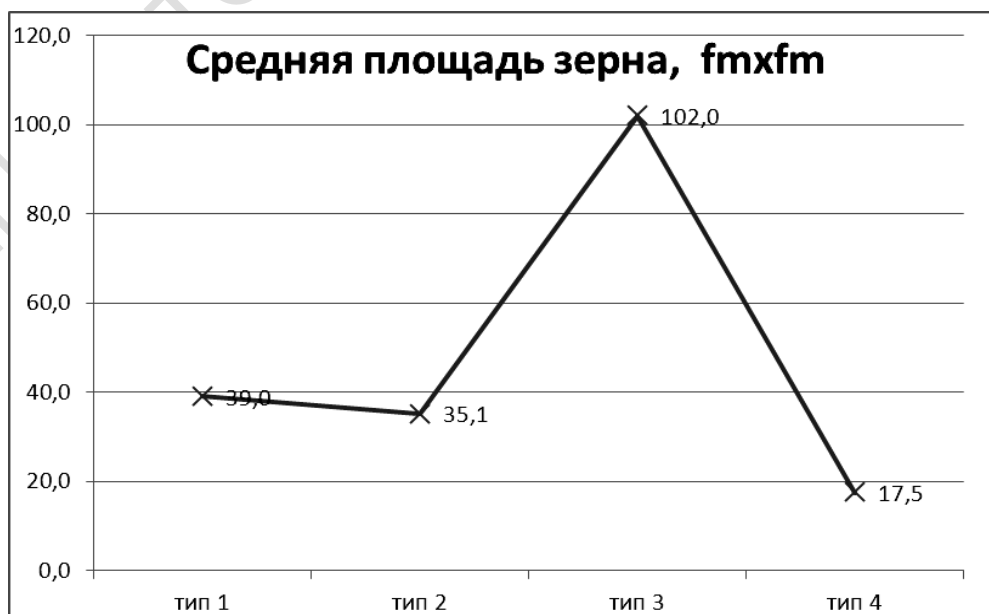


Рисунок 3 – Результаты измерения площади кристаллитов методом АСМ

Исследования медных межсоединений в слое фоторезиста методом растровой электронной микроскопии показали, что полученные периодические структуры, соответствующие типу 3, имеют четкие границы раздела. Высота медных межсоединений практически равна толщине слоя фоторезиста, как это видно на изображении микропрофиля исследуемой структуры, полученном методом РЭМ (рисунок 4).

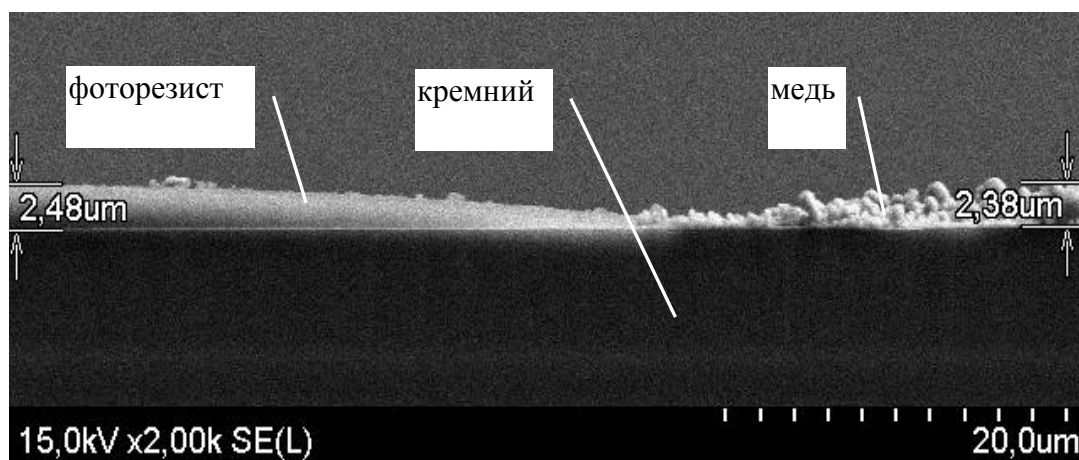
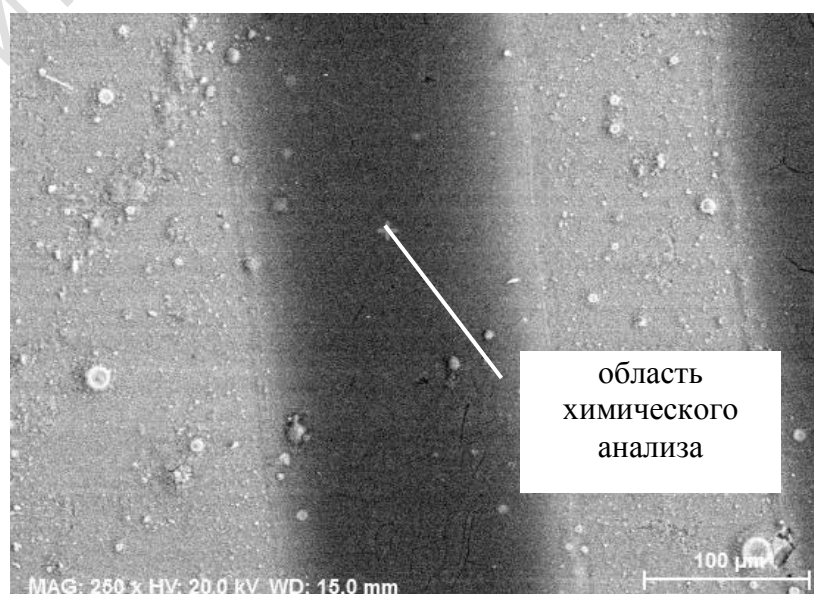


Рисунок 4 – Изображение микропрофиля покрытия, полученное методом РЭМ

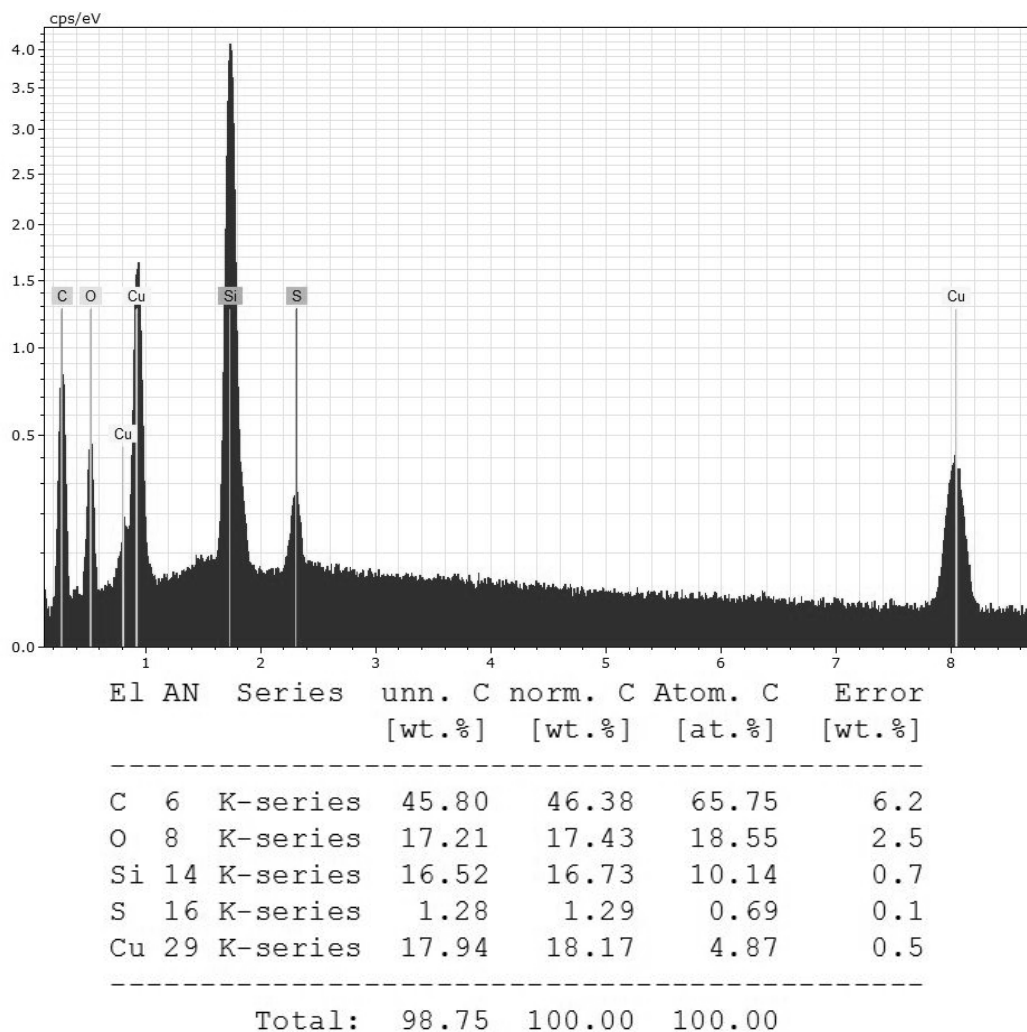
Химический состав в пределах каждой из зон периодической структуры фоторезист – медь однородный, физико-химические свойства фоторезиста в процессе электрохимического осаждения меди при воздействии стимулирующего ультрафиолетового излучения практически не изменились. Область исследования химического состава и его результаты приведены на рисунках 5 а) и 5 б) соответственно.

### Заключение

Предложен метод формирования межслойных соединений на поверхности кремния в слое фоторезиста. В данном методе наряду с технологиями вакуумной металлизации использована технология электрохимического осаждения при воздействии стимулирующего ультрафиолетового излучения. Полученные медные межсоединения обладают плотноупакованной поверхностной структурой и однородны по химическому составу. Полученные результаты указывают на возможность использования такого метода при формировании изделий электронной техники.



а)



б)

Рисунок 5 – Результаты исследования химического состава

### Литература

1. Moore, G.E. Lithography and the future of Moore's law / G.E. Moore // Proc. SPIE. – 1995. – Vol. 2440. – P. 2–17.
2. Zelentsov, S.V. Photoresists / S.V. Zelentsov, N.V. Zelentsova // Marcel Dekker Enc. Chem. Techn. – New York : Taylor & Francis, 2006. – P. 2111–2127.
3. Thompson, L.F. Introduction to Microlithography / L.F. Thompson, C.G. Willson, M.J. Bowden // 2nd Ed. American Chemical Society. – Washington : DC, 1994.
4. Моро, У. Микролитография / У. Моро. – М. : Мир, 1990. – Т. 1, 2.
5. Зеленцов, С.В. Современная фотолитография : уч.-метод. мат. по прогр. повыш. квал. «Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем» / С.В. Зеленцов, Н.В. Зеленцова. – Нижний Новгород, 2006. – 56 с.
6. Edelstein, D.C. IBM Res. Magazine / D.C. Edelstein. – 1997. – Vol. 16, № 4. – P. 773.
7. Rosenber, R. Annu. Rev. Mater. Sci. / R. Rosenber, D.C. Edelstein, C.-K. Hu et al. – 2000. – Vol. 30. – P. 229.
8. Дубинин, М.В. Формирование наноразмерных медных межсоединений элементов интегральных микросхем / М.В. Дубинин, В.Е. Борисенко // Доклады БГУИР. – 2011. – № 8(62). – С. 34–38.