

УДК 621.3.049.779

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МЕТАЛЛИЗАЦИИ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИНАХ

Дидык П.И. \*, Жуков А.А. \*\*, Подгородецкий С.Г. \*\*\*,  
Заботин Ю.М. \*\*\*\*, Голиков Е.А.

*Российская корпорация ракетно-космического приборостроения  
и информационных систем,  
Российские космические системы, ул. Авиамоторная, 53, Москва, 111250, Россия*

*\* e-mail: Felix\_engine@mail.ru*

*\*\* e-mail: and\_zhukov@mail.ru*

*\*\*\* e-mail: rengokku5@mail.ru*

*\*\*\*\* e-mail: zabolello@yandex.ru*

---

Методами электронной микроскопии исследована металлизация сквозных отверстий в кремниевых пластинах. Получены зависимости толщин металлизации на различной глубине сквозных отверстий в пластинах при одностороннем и двухстороннем распылении хрома и меди методом вакуумного магнетронного распыления. Получены зависимости толщин металлизации на различной глубине сквозных отверстий при гальваническом наращивании. Определена минимальная толщина металлизации, при которой обеспечивается сплошная пленка металлов по всей глубине сквозных отверстий в пластинах.

*Ключевые слова:* металлизация сквозных отверстий, запыление стенок, отверстия в кремниевых пластинах, тонкопленочная технология.

---

Одним из приемов повышения степени интеграции кремниевых микроэлектронных приборов ракетно-космической и авиационной техники является применение 3D-конструкций, в которых используют сквозные металлизированные отверстия, обеспечивающие электрический контакт между противоположными сторонами кремниевой подложки [1, 2]. Металлизация сквозных отверстий в кремниевых подложках применяется в объемных микроэлектронных устройствах — «системах в корпусе» [3], в которых один кристалл расположен над другим и при этом требуется сформировать межсо-

единения на противоположной стороне кристалла. Используется металлизация для обеспечения локального теплоотвода от точечного источника тепла, для реализации СВЧ-фильтров на основе интегрированных в подложку волноводов [4] или для устройств микросистемной техники [5]. Известные химические методы формирования металлизации сквозных отверстий для многослойных печатных плат [6, 7] не подходят вследствие ограничений на размеры отверстий, поэтому предпринимаются попытки распространить методы тонкопленочной технологии для металлизации сквозных отверстий

в кремнии [8]. Основной тенденцией развития 3D-микроразнообразных конструкций остается уменьшение диаметра сквозного отверстия при одновременном сохранении электрических характеристик сквозной металлизации. При этом параметры формирования сквозных отверстий травлением с последующим осаждением металлов оказывают большое влияние на характеристики устройств. Критериями качества являются минимальная шероховатость стенок сквозных отверстий, надежное запыление краев отверстий и стенок получаемых пленок по глубине отверстий. Поскольку систематических данных, отражающих закономерности формирования металлизации сквозных отверстий, в кремнии не обнаружено, экспериментальная оценка качества металлизации, сформированной методами тонкопленочной технологии, представляется весьма актуальной.

Объектами исследования служили кремниевые пластины толщиной  $400 \pm 10$  мкм со сквозными отверстиями диаметром  $170 \pm 10$  мкм с напыленными последовательно методом вакуумного магнетронного распыления слоями хрома и меди (Cr-Cu) с предварительным прогревом при температуре  $170 \pm 5$  °C в течение 20 минут и последующим гальваническим нанесением слоев (см. таблицу).

Сквозные отверстия получали методами плазмохимического травления кремния через маску алюминия, сформированную вакуумным магнетронным распылением толщиной 1 мкм с последующей фотолитографией [9]. Полиимидное покрытие, толщиной 0,5–3 мкм, формировали на тыльной стороне пластины из раствора полиамидокислоты на основе диангидрида и оксидианилина в полярном растворителе с последующими сушкой при температуре 80–120 °C и термоимидизацией при температуре не ниже 350 °C в течение не менее 30 мин [10]. Наличие полиимида на обратной стороне пластины обеспечивает образование фаски при

сквозном травлении кремния (рис. 1). После формирования сквозных отверстий проводили плазмохимическое травление полиимида и жидкостное травление алюминия [11]. Фаска на лицевой стороне образуется благодаря изотропному травлению кремния через алюминиевую маску.

Наличие фасок у сквозных отверстий обеспечивает последующее равномерное формирование металла на поверхности пластин и сквозных отверстий без образования тонких слоев или разрывов металлизации на углах, что исключает электрические разрывы дорожек и образование зон с малой площадью поперечного сечения проводника, приводящих к снижению плотности тока, проходящего через сквозные отверстия.

Для исследования металлизации в сквозных отверстиях кремниевые пластины резали вдоль оси отверстий методом дисковой резки. После чего на полученных структурах определяли толщину металлизации и элементный состав методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). При резке образуются сколы кремния на углах отверстий, а также задиры и отслоения металлизации. Для ми-

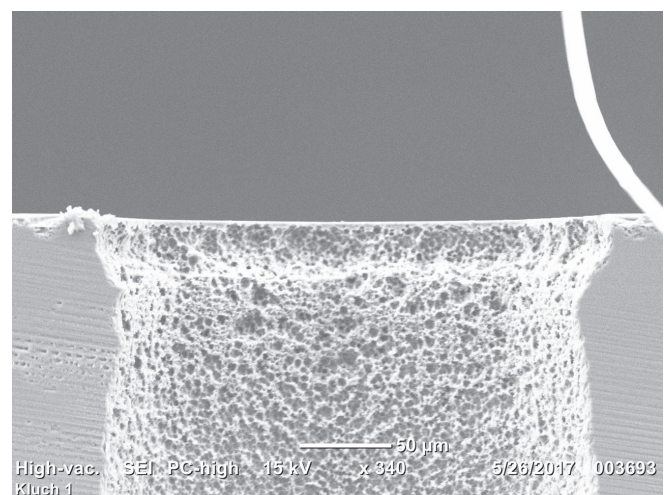


Рис. 1. Микрофотография с СЭМ разреза сквозных отверстий в кремниевых пластинах в области фаски

**Объекты исследования**

Типы образцов	Количество пластин	Металлизация пластин
1	3	Односторонняя металлизация Cr-Cu (1 мкм)
2	3	Односторонняя металлизация Cr-Cu (5 мкм)
3	3	Двухсторонняя металлизация Cr-Cu (3 мкм)
4	9	Двухсторонняя металлизация Cr-Cu (4 мкм)
5	3	Двухсторонняя металлизация Cr-Cu (4 мкм), гальваническое нанесение Cu (2 мкм) и золота Au (1,5 мкм)
6	3	Двухсторонняя металлизация Cr-Cu (4 мкм), гальваническое нанесение Cu (2 мкм) и сплава SnBi (олово 98–99%, висмут 1–2%) (3 мкм)

нимизации погрешности производился ряд измерений на одинаковых глубинах в различных отверстиях на одной пластине.

На рис. 2 представлена микрофотография образцов типа 1 с СЭМ разрезанных сквозных отверстий в кремниевых пластинах с односторонней металлизацией Cr-Cu (1 мкм). При напылении с лицевой стороны запыляется полностью поверхность, но фаска и стенка имеют несплошную структуру металла (рис. 2,а). Металлизация стенок ближе к выходной части отверстия имеет ярко выраженную островковую структуру (рис. 2,б), что подтверждается результатами анализа химического состава поверхности. На рис. 2 показаны точки и области исследования состава измерительными средствами СЭМ. В области 5 (выделено рамкой на рис. 2,а) массовая доля меди составляет 31% по сравнению с 68% кремния. В точке 6 (показано крестом на рис. 2,а) массовая доля меди составила 15%, что свидетельствует об островковой структуре пленки Cr-Cu. В области 7 (выделено рамкой на рис. 2,б), в точке 2 (показано крестом на рис. 2,б) массовая доля меди менее 21%, а в точке 4 (показано крестом на рис. 2,б) присутствует только кремний, что подтверждает наличие металлизации в виде островковой плёнки. Исходя из анализа химического состава поверхности, пленка в сквозных отверстиях не сплошная, а островковая.

При анализе сквозных отверстий в кремниевых пластинах в образцах типа 2 с односторонней металлизацией Cr-Cu (5 мкм) металлизация имеет сплошную неразрывную структуру по всей площади отверстий. Анализ химического состава поверхности пленки в разных точках поверхности сквоз-

ных отверстий с металлизацией показал содержание меди 92—95 %, что подтверждает сплошную структуру пленки металлизации.

Как и образцы типа 2, пластины с двухсторонней металлизацией Cr-Cu (3 мкм) (образцы типа 3) имеют сплошные пленки и равномерное запыление фасок (рис. 3).

На рис. 4 представлены микрофотографии образцов типа 4 с СЭМ разрезанных пластин вдоль сквозных отверстий в кремниевых пластинах с двухсторонней металлизацией Cr-Cu (4 мкм). Исходя из анализа состава поверхности, пленки металлов полностью закрывают все неровности стенок сквозных отверстий.

Далее на образцах типа 1—4 проведено измерение толщин металлизации при напылении вакуумным магнетронным распылением хрома и меди, в разных точках на стенках сквозных отверстий (рис. 5), где «0» — поверхность лицевой стороны пластин, а «400» — поверхность тыльной стороны. Установлено, что при односторонней металлизации толщина пленки уменьшается практически линейно с увеличением глубины отверстий. Исходя из результатов химического анализа поверхности, описанных выше, при малых толщинах (менее 1 мкм) при напылении с одной стороны при увеличении глубины структура плёнки изменяется из сплошной в островковую с дальнейшим увеличением процента кремния по отношению к металлизации. Электрический контакт при этом между лицевой и тыльной сторонами отсутствует.

При двухсторонней металлизации полученные плёнки металлов имеют минимальную толщину в середине сквозных отверстий. При разработке при-

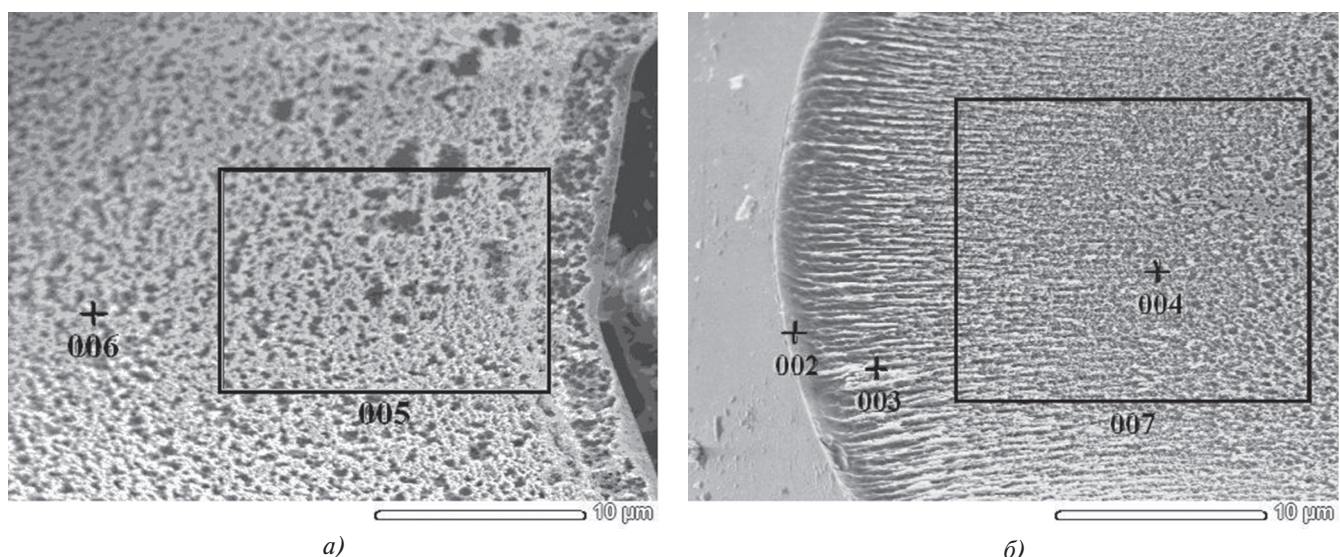


Рис. 2. Микрофотографии образцов типа 1 с СЭМ разрезанных сквозных отверстий в кремниевых пластинах с односторонней металлизацией Cr-Cu (1 мкм): а — фаска и стенка со стороны запыления; б — фаска и стенка с обратной стороны

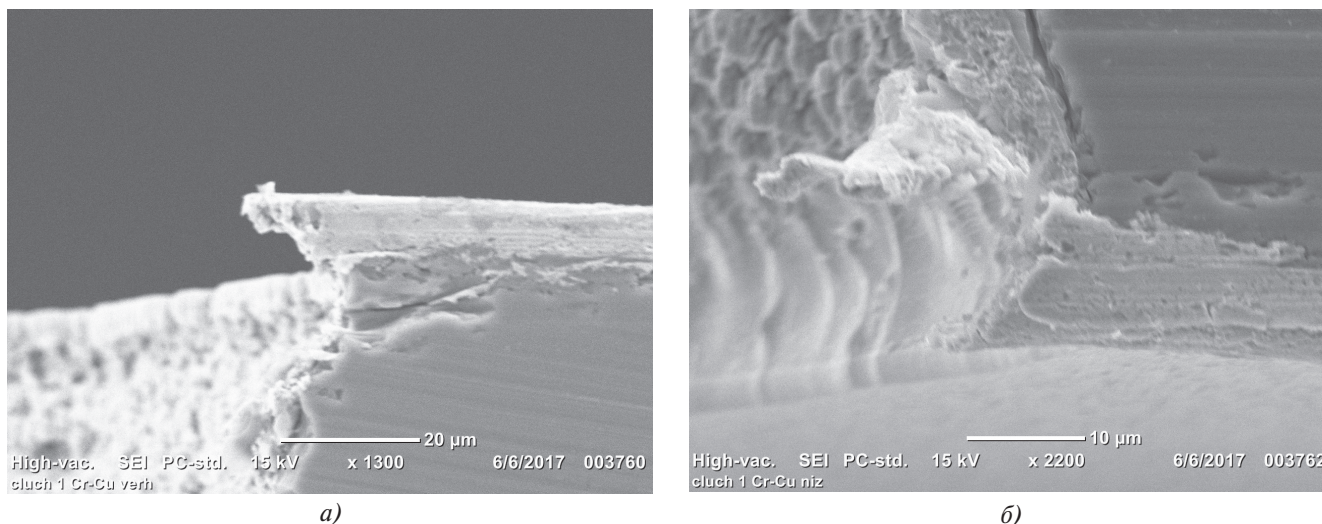


Рис. 3. Микрофотографии образцов типа 3 с СЭМ разрезанных сквозных отверстий в кремниевых пластинах с двухсторонней металлизацией Cr-Cu (3 мкм): а — фаска сквозного отверстия с лицевой стороны; б — фаска сквозного отверстия с тыльной стороны

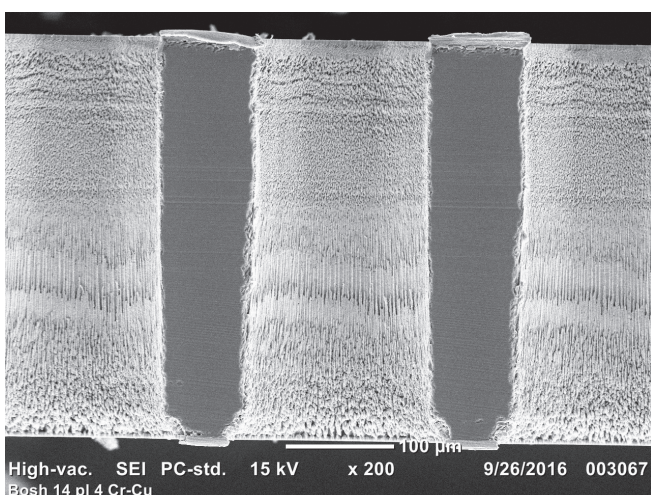


Рис. 4. Микрофотография образцов типа 4 с СЭМ разрезанных сквозных отверстий в кремниевых пластинах с двухсторонней металлизацией Cr-Cu (4 мкм)

боров со сквозными отверстиями необходимо учитывать, что минимальная толщина плёнки, определяющая электрические характеристики прибора, зависит от толщины пластины и находится в середине отверстий.

Определено, что сплошная металлическая пленка образуется при толщине Cr-Cu более 1,7 мкм. Для обеспечения толщины оптимально проводить двухстороннее напыление Cr-Cu толщиной более 3 мкм. При этом минимальная толщина металлизации Cr-Cu, равная 1,7 мкм, находится в середине сквозных отверстий.

Нами проведены дополнительные исследования по распределению гальванически осажденных слоев меди и золота (образцы типа 5) и меди и сплава SnBi (образцы типа 6) на пластинах с двухсторонней металлизацией Cr-Cu (4 мкм) (образцы типа 4).

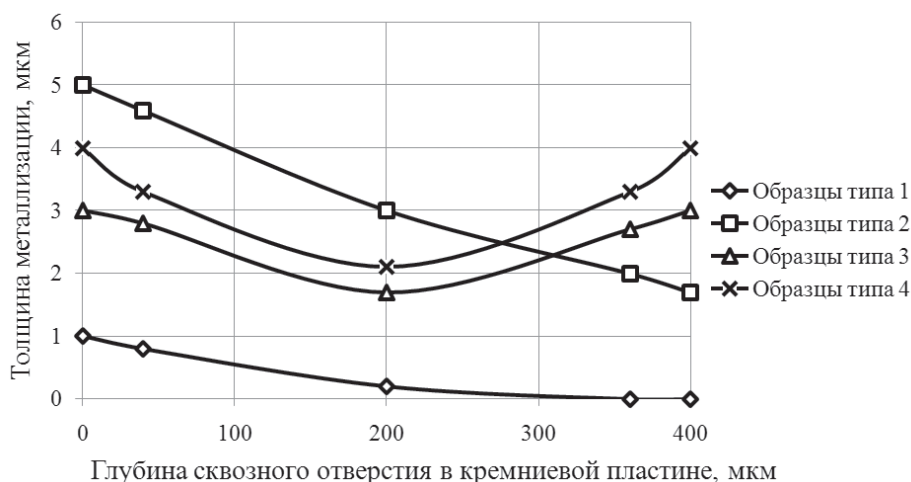
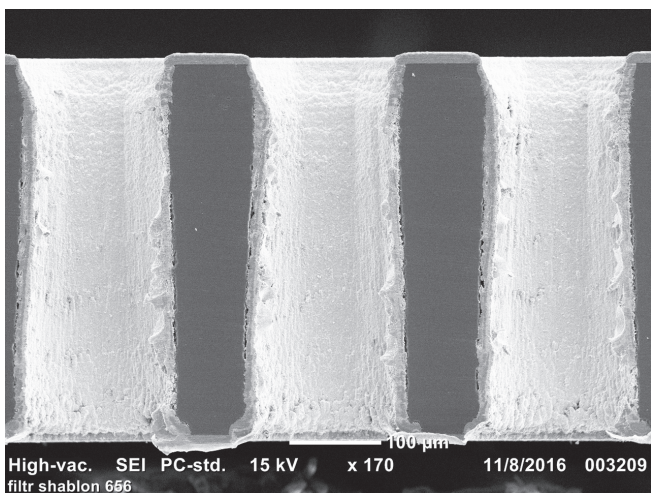


Рис. 5. Толщина металлизации при варьируемой глубине сквозных отверстий в пластинах с металлизацией Cr-Cu: образцы типа 1 — с односторонней (1 мкм); образцы типа 2 — с односторонней (5 мкм); образцы типа 3 — с двухсторонней (3 мкм); образцы типа 4 — с двухсторонней (4 мкм)

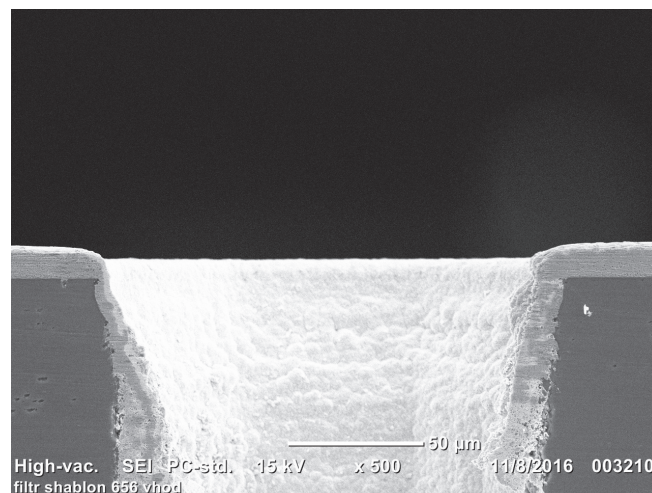
На рис. 6 представлены микрофотографии образцов типа 5 с СЭМ разрезанных пластин вдоль сквозных отверстий в кремниевых пластинах. Средствами СЭМ измерены габаритные размеры сквозных отверстий (рис. 6,а), толщины металлизации лицевой стороны, фаски (рис. 6,б), на стенках отверстий (рис. 6,в), выходной фаски и металлизации обратной стороны (рис. 6,г). Толщина металлизации середины разреза сквозного отверстия в кремниевой пластине составляет 6,0–6,15 мкм. Толщина металлизации лицевой и тыльной сторон пластины и фасок составляет 7,5–7,7 мкм. Определено, что при гальваническом осаждении Cr-Au происходит зарастивание металлизацией неровностей, образующихся в процессе сквозного травления кремния. Анализ химического состава поверхности металлизации в сквозных отверстиях и на поверхностях пластин показал содержание золота 87–94 %, меди 3–5 %, что подтверждает сплошную структуру пленки металлизации.

На рис. 7 представлены микрофотографии образцов типа 6 с СЭМ разрезанных пластин вдоль сквозных отверстий в кремниевых пластинах. Измерены габаритные размеры сквозных отверстий (рис. 7,а), толщины металлизации лицевой стороны, фаски (рис. 7,б), на стенках отверстий (рис. 7,в), выходной фаски и металлизации обратной стороны (рис. 7,г). Толщина металлизации середины разреза сквозного отверстия в кремниевой пластине составляет 6,9–7,3 мкм. Толщина металлизации лицевой и тыльной сторон пластины и фасок составляет 8,4–8,7 мкм. Анализ химического состава поверхности металлизации в сквозных отверстиях и на поверхностях пластин показал наличие олова 93–95%, висмута 1–3%.

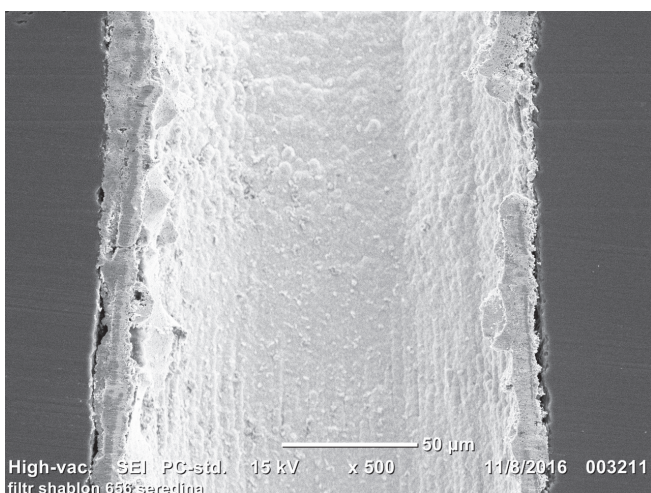
На образцах типа 4–6 проведено измерение толщин металлизации, напыленными методами вакуумного магнетронного распыления Cr-Cu (образцы типа 4) с последующим гальваническим нанесением Cu-Au (образцы типа 5) или последующим



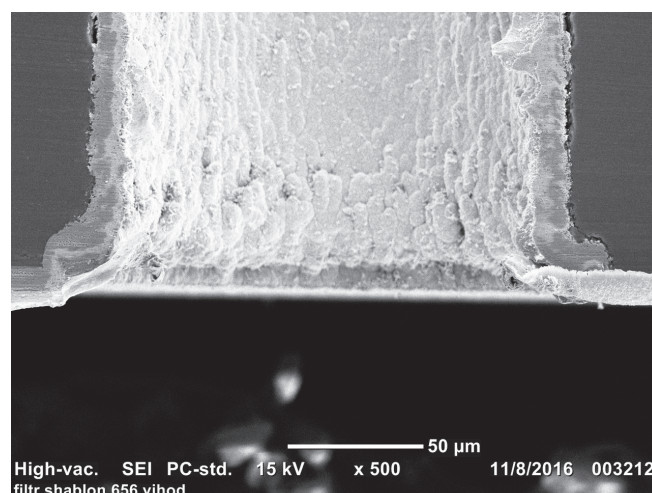
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Микрофотографии образцов типа 5 с СЭМ разрезанных сквозных отверстий в кремниевых пластинах с двухсторонней металлизацией Cr-Cu-Au

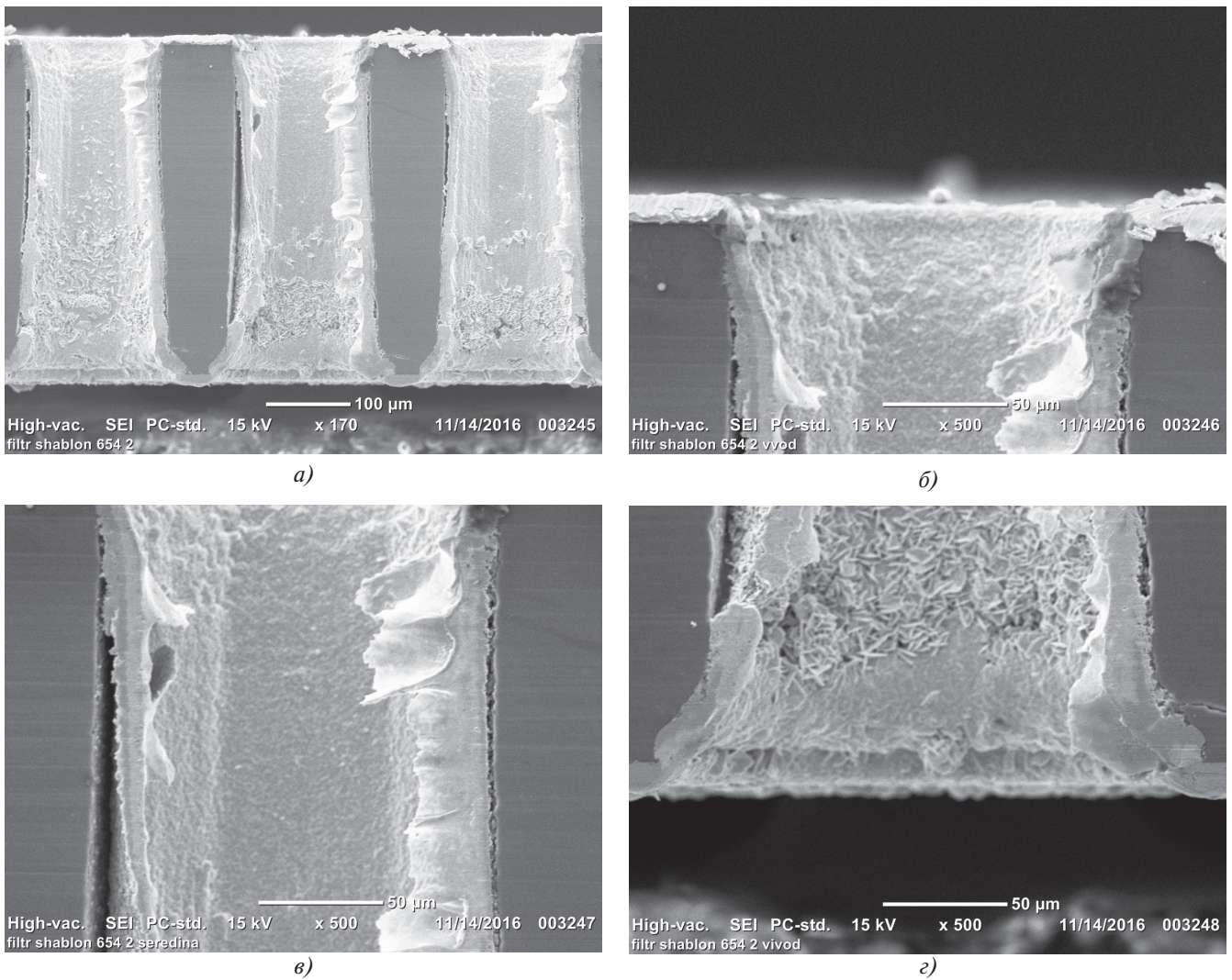


Рис. 7. Микрофотографии образцов типа 6 с СЭМ разрезанных сквозных отверстий в кремниевых пластинах с двухсторонней металлизацией Cr-Cu-SnBi

гальваническим нанесением Cu — SnBi (образцы типа 6), в разных точках на стенках сквозных отверстий (рис. 8).

Исходя из сравнения образцов типа 4 с образцами типа 5 и 6, определено, что толщина гальванически осажденной металлизации одинакова как

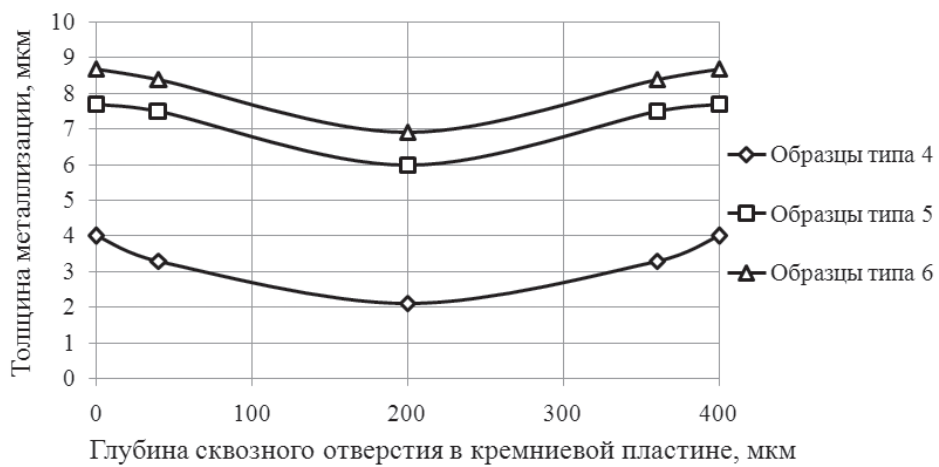


Рис. 8. Толщина металлизации при варьируемой глубине отверстий в пластинах: образцы типа 4 — с двухсторонней металлизацией Cr-Cu (4 мкм); образцы типа 5 — с двухсторонней металлизацией Cr-Cu (4 мкм) с гальваническим нанесением Cu-Au; образцы типа 6 — с двухсторонней металлизацией Cr-Cu (4 мкм) гальваническим нанесением Cu-SnBi

на лицевой и тыльной сторонах пластины, так и на фасках и стенках сквозных отверстий. При гальваническом осаждении происходит заращивание металлизацией неоднородностей кремния на стенках сквозных отверстий.

### Выводы

Для изготовления металлизации сквозных отверстий в кремниевых пластинах для приборов ракетно-космической и авиационной техники с наиболее близкими характеристиками по толщине осажденной пленки на всех элементах конструкции оптимально проводить процесс запыления в два этапа. Сначала методами вакуумного магнетронного распыления изготовить металлизацию с минимальной толщиной, обеспечивающей образование сплошной металлической пленки. При двухсторонней металлизации методами вакуумного магнетронного распыления хрома и меди полученные пленки имеют минимальную толщину в середине сквозных отверстий. Сплошная металлическая пленка образуется при толщине Cr-Cu более 1,7 мкм на поверхности сквозных отверстий. Для обеспечения толщины необходимо проводить двухстороннее напыление Cr-Cu на поверхности пластин методами вакуумного магнетронного распыления, толщиной более 4 мкм. Затем методом гальванического осаждения провести заращивание до нужной толщины металлизации. Изменение толщины металлизации при одностороннем напылении, полученной методом вакуумного магнетронного распыления в сквозных отверстиях, при увеличении глубины отверстий имеет линейный убывающий характер. При толщине менее 1 мкм поверхность пленки в сквозных отверстиях не сплошная, а островковая. При напылении с лицевой стороны образуется сплошная пленка на поверхности пластины, но на фасках и стенках структура металла не сплошная.

### Библиографический список

1. *Liu D., Gaucher B., Pfeiffer U., Grzyb J.* Advanced Millimeter-Wave Technologies: Antennas, Packaging and Circuits. — John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2009. — 827 p.
2. *Голишников А.А., Путря М.Г.* Разработка процесса глубокого плазменного травления кремния для технологии трехмерной интеграции кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 1. С. 36-41.
3. *Васильев А.* Современные технологии 3D-интеграции // Компоненты и технологии. 2010. № 1. С. 156-158.
4. *Pathak G.* Substrate Integrated Waveguide based RF MEMS Cavity Filter // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2013. Vol. 2. Issue 5, pp. 46-49.
5. *Куликов К.В., Ланцов В.Н.* Микроэлектромеханические устройства систем связи: Учебн. пособие. — Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. — 94 с.
6. *Галецкий Ф.П., Лейтес И.Л., Петров Л.Г.* Разработка технологии изготовления высокоплотных СВЧ многослойных печатных плат. URL: [http://www.rts-engineering.ru/TechPro/tpPP/tpPP\\_17.html](http://www.rts-engineering.ru/TechPro/tpPP/tpPP_17.html)
7. *Ямпольский А.М., Ильин В.А.* Краткий справочник гальванотехника. — Л.: Машиностроение, 1981. — 269 с.
8. *Дидык П.И., Голиков Е.А., Жуков А.А.* Структура пленок сплава алюминий-кремний, полученных методом физического магнетронного распыления // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 182-185.
9. *Заботин Ю.М., Ануров А.Е., Жуков А.А., Подгородецкий С.Г.* Способ изготовления сквозных металлизированных микроотверстий в кремниевой подложке. Патент 2629926 РФ. Бюл. № 25, 04.09.2017.
10. *Жуков А.А.* Физико-химические и технологические основы получения полиимидных структур для микроэлектронных устройств, устройств микромеханики и микросенсоры: Дисс. ... д-ра техн. наук. — М.: МАТИ, 2003. — 315 с.
11. *Жуков А.А., Заботин Ю.М., Подгородецкий С.Г., Ануров А.Е.* Профиль, морфология и элементный состав поверхности сквозных микроотверстий в кремниевых пластинах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 10. С. 38-43.

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF METALLIZATION QUALITY OF THROUGH HOLES IN SILICON WAFERS

Didyk P.I.\* , Zhukov A.A.\*\* , Podgorodetskii S.G.\*\*\* , Zabotin Yu.M.\*\*\*\* , Golikov E.A.

Russian Space Systems,  
53, Aviamotornaya str., Moscow, 111250, Russia,

\* e-mail: Felix\_engine@mail.ru

\*\* e-mail: and\_zhukov@mail.ru

\*\*\* e-mail: rengokku5@mail.ru

\*\*\*\* e-mail: zabolello@yandex.ru

### Abstract

Metallization of through holes in silicon wafers has been investigated by electron microscopy methods. Dependences of the thicknesses of metallization at various depths of through holes in wafers for single-sided and double-sided sputtering of chromium and copper, with thickness of 1  $\mu\text{m}$  to 5  $\mu\text{m}$ , as well as with successive galvanic deposition of layers of chrome and copper and chrome and SnBi alloy (tin 98-99%, bismuth 1-2%) on the films of chromium and copper were obtained by vacuum magnetron sputtering method. Optimal modes of through holes metallization in silicon wafers process with closest characteristics of film deposition along on all structure elements, consisting in performing the process in two stages were determined. Initially, employing vacuum magnetron sputtering method prepare metallization with minimum thickness, ensuring formation of continuous metal film. With two-sided metallization by vacuum magnetron sputtering of chrome and copper, the derived films have minimum thickness in the middle of the through holes. The continuous film is formed at chrome and copper thickness more than 1.7  $\mu\text{m}$  on the surface of the through holes. To ensure the thicknesses it is necessary to perform two-sided sputtering of chrome and copper by vacuum magnetron sputtering methods with thickness less than 4  $\mu\text{m}$ . Then, by galvanic precipitation method refilling to the desired thickness should be performed by galvanic precipitation method. Thickness changing at one-sided metallization sputtering, obtained in through holes by vacuum magnetron sputtering method presents linear decreasing character with increase of the holes' depth.

The minimum thickness of metallization is determined, at which a continuous metal film is provided along the entire depth of the through holes in the wafers. With a thickness of less than 1  $\mu\text{m}$ , the surface of the film in the through holes is not continuous, but an island one. When sprayed from the front side, a continuous

film forms on the surface of the plate, but the metal structure it is not continuous on the chamfers and walls.

**Keywords:** metallization of through holes, dusting of walls, holes in silicon wafers, thin-film technology.

### References

1. Liu D., Gaucher B., Pfeiffer U., Grzyb J. *Advanced Millimeter-Wave Technologies: Antennas, Packaging and Circuits*. John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2009. 827 p.
2. Golishnikov A.A., Putrya M.G. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2014, no. 1, pp. 36-41.
3. Vasil'ev A. *Komponenty i tekhnologii*, 2010, no. 1, pp. 156-158.
4. Pathak G. Substrate Integrated Waveguide based RF MEMS Cavity Filter. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2013, vol. 2, issue 5, pp. 46-49.
5. Kulikov K.V., Lantsov V.N. *Mikroelektromekhanicheskoye ustroystvo sistem svyazi* (Microelectromechanical devices of communication systems), Vladimir, VIGU, 2014, 94 p.
6. Galetskii F.P., Leites I.L., Petrov L.G. *Razrabotka tekhnologii izgotovleniya vysokoplotnykh SVCh mnogoslownykh pechatnykh plat*, available at: [http://www.rts-engineering.ru/TechPro/tpPP/tpPP\\_17.html](http://www.rts-engineering.ru/TechPro/tpPP/tpPP_17.html)
7. Yampol'skii A.M., Il'in V.A. *Kratkii spravochnik gal'vanotekhnika* (Quick reference guide of electroplater), Leningrad, Mashinostroenie, 1981, 269 p.
8. Didyk P.I., Golikov E.A., Zhukov A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 182-185.
9. Zabotin Yu.M., Anurov A.E., Zhukov A.A., Podgorodetskii S.G. *Patent RU 2629926*, 04.09.2017.
10. Zhukov A.A. *Fiziko-khimicheskie i tekhnologicheskie osnovy polucheniya poliimidnykh struktur dlya mikroelektronnykh ustroystv, ustroystv mikromekhaniki i mikrosensoriki* (Physico-chemical and technological foundations of polyimide structures obtaining for microelectronic devices, devices of micromechanics and microsensor), Doctor's thesis, Moscow, MATI, 2003, 315 p.
11. Zhukov A.A., Zabotin Yu.M., Podgorodetskii S.G., Anurov A.E. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnyye i neitronnyye issledovaniya*, 2017, no. 10, pp. 38-43.