

УДК 621.793.14

**Л.А. Фоменко<sup>1</sup>, Т.Н. Соколова<sup>2</sup>, Е.Л. Сурменко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Саратовский государственный аграрный университет  
им. Н.И.Вавилова, Саратов, Россия<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет  
им. Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РЕСТАВРАЦИИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Обсуждается разработанная технология реставрации дефектов защитных покрытий элементов топологии тонкопленочных гибридных интегральных схем (ГИС), в основе которой лежит процесс локального лазерного электрохимического осаждения золота и сплава олово–висмут на медь излучением волоконного лазера. Натурные испытания реставрированных ГИС показали удовлетворительное качество локальных лазерно-электрохимических осадков золота и сплава олово–висмут, а также сохранность номиналов тонкопленочных резисторов плат ГИС в оптимальных режимах лазерного электролиза.

**Ключевые слова:** гибридные интегральные схемы, волоконный лазер, лазерно-электрохимическое осаждение металлов, элементы топологии, электролиз, реставрация.

**L.A. Fomenko<sup>1</sup>, T.N. Sokolova<sup>2</sup>, E.L. Surmenko<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov,  
Saratov, Russian Federation<sup>2</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,  
Saratov, Russian Federation

## **FIBER LASER APPLICATION IN LASER-ELECTROCHEMICAL RESTORATION OF PROTECTIVE COATINGS OF THIN-FILM HYBRID INTEGRATED CIRCUITS**

Paper describes the developed technology of restoration of defects in the protective coatings of the elements of the topology of thin-film hybrid integrated circuits (HIC). The restoration technology is based on local fiber-laser electrochemical deposition of gold and an alloy of tin-bismuth in copper. Full-scale tests of restored HIC showed satisfactory quality of local laser-electrochemical gold and tin-bismuth precipitation, as well as the preservation of the values of the thin-film resistors boards of HIC in the optimal regimes of laser electrolysis.

**Keywords:** hybrid integrated circuits, fiber laser, laser-electrochemical deposition of metals, elements of the topology, electrolysis, restoration.

## **Введение**

Производство тонкопленочных ГИС предусматривает нанесение защитных покрытий элементов топологии золотом или сплавом олово–висмут. Покрытие производится либо в «окнах» фотолитографической маски, либо с помощью технологических перемычек. Из-за несовершенства технологии возникают дефекты защитного покрытия в виде непокрытых мест или протравов, дающие до половины от общего числа бракованных ГИС. При средней стоимости платы ГИС от 500 до 5000 руб./шт. реставрация защитных покрытий является экономически целесообразной операцией.

Если толщина защитных покрытий равна 2–6 мкм, то дефекты не могут быть устранены традиционными методами химической металлизации из растворов, поскольку небольшая селективность осаждения металла быстро исчезает уже при нанесении первых слоев защитного покрытия на месте локализации дефекта [1]. Поэтому регенерация бракованных плат ГИС сводилась, как правило, к химическому растворению металлизированных слоев плат и повторным технологическим операциям напыления, химической и электрохимической металлизации и фотолитографии.

При локальном лазерном нагреве границы металл – электролит [2] селективность осаждения металла значительно повышается, при этом важную роль играет паровая кавитационная модуляция скорости реакции лазерного электроосаждения (ЛЭО) металлов [3]. Иногда это приводит к пиролитическому режиму осаждения металла, что было обнаружено впервые при ЛЭО Au<sub>1</sub> из термически неустойчивого раствора KAu(CN)<sub>2</sub> вблизи потенциала коррозии Cu-катода. При этом за счет образующегося, сильно поглощающего лазерное излучение коррозионного слоя Cu<sub>2</sub>O возникает яркая вспышка, обусловленная паровым кавитационным коллапсом при протекании пиролитической реакции осаждения золота, которая поддерживается далее в автокаталитическом режиме за счет выделения тепла при сгорании летучих продуктов пиролиза (HCN и H<sub>2</sub>), что позволяет обеспечить быстрое устранение дефектов защитных покрытий и увеличить процент выхода годных ГИС.

## 1. Методика эксперимента

Разработана технология реставрации защитных покрытий ГИС, в основе которой лежит процесс локального лазерного электроосаждения (ЛЭО) золота и сплава олово–висмут на медь. Используемая технологическая установка на базе волоконного лазера ИПМ 100 оснащена оптической системой типа УОСЛ, системой телемониторинга, устройством двухкоординатного перемещения с управлением от ПК, специальной электрохимической ячейкой с двухкоординатным игольчатым микроконтактом. Ячейка снабжена системой периодического охлаждения дна, включаемой после обработки серии бракованных плат ГИС для предотвращения паразитарного разогрева электролита. Параметры лазерного излучения: максимальная мощность  $P_{\max} = 120$  Вт, длина волны  $\lambda = 1070$  нм, поляризация случайная, качество пучка  $M^2 = 1,05$ . Преимущество применяемого излучателя перед ранее используемым [3] – в потребляемой мощности 0,24 кВт против 3,5 кВт, а также в отсутствии двухконтурного охлаждения и малом весе – 8 кг. Схема установки реставрации представлена на рис. 1.

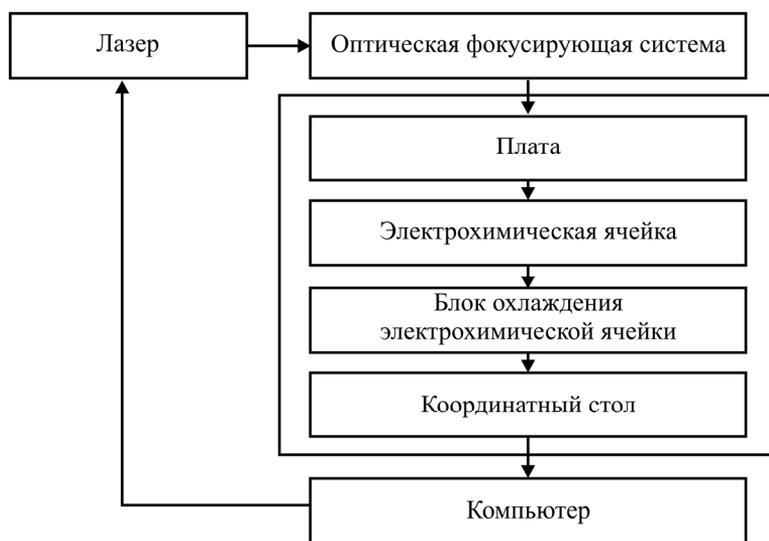


Рис. 1. Экспериментальная схема установки реставрации плат

Катодами служили платы ГИС СВЧ; в качестве анодов использовали золотую фольгу (для ЛЭО золота) и фольгу из олова марки М.01 (для ЛЭО сплава олово–висмут).

Рабочие электролиты приготавливались на основе деионизированной воды с удельной электропроводностью  $9,03 \cdot 10^{-7}$  См/см и реактивов (г/л):  $\text{SnSO}_4 - 50$ ;  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - 1$ ;  $\text{H}_2\text{SO}_4 - 100$ ;  $\text{NaCl} - 0,5$ ; «ОС-20» – 5 (для ЛЭО сплава олово – висмут);  $\text{KAu}(\text{CN})_2 - 12$ ; лимонная кислота – 30; цитрат калия – 40 при  $\text{pH} = 5$  (для ЛЭО золота). Значение  $\text{pH}$  рабочих растворов контролировалось с помощью  $\text{pH}$ -милливольтметра  $\text{pH}-201$  с точностью  $\pm 0,005$  и, в случае необходимости, корректировалось добавками растворов  $\text{KOH}$  или  $\text{NaOH}$ .

## 2. Обсуждение результатов

Селективность осаждения металлов количественно оценивалась по коэффициенту лазерного ускорения  $K_Y$ , представляющему собой отношение плотности тока  $i$  лазерно-стимулированного процесса к «темновой плотности тока»  $i_T$ . Оптимизация процесса производилась посредством подбора катодного потенциала  $E$  и интенсивности облучения  $W$ , обеспечивающих максимальное значение коэффициента ускорения  $K_Y$ .

Время зарастивания  $\tau_0$  «точечного» дефекта определялось как отношение характерной толщины  $L_0$  защитного покрытия к скорости осаждения  $j_0$  металла внутри сфокусированного лазерного пятна. Величина  $j_0$  связана со среднерадимальной плотностью тока  $i_0$  внутри сфокусированного лазерного пятна законом Фарадея. Величина  $i_0$  определялась в отдельных экспериментах, выполняемых по методике локального фотолитографического катода [4].

Технологическая схема реставрации включает: идентификацию дефектов; обезжиривание, промывку и монтаж плат ГИС на оснастке; локальное лазерное электроосаждение металла защитного покрытия по месту дефекта; демонтаж оснастки; промывку и сушку.

Время обработки  $\tau$  дефектной платы ГИС рассчитывалось из эмпирического соотношения [5]:

$$\tau = \frac{S_{\Sigma}}{\pi r_0^2} \tau_0 + \tau_1 + \tau_2, \quad (1)$$

где  $S_{\Sigma}$  – суммарная площадь дефектов;  $\tau_1 \approx 3$  мин – время, затрачиваемое на монтаж платы на оснастке;  $\tau_2 \approx 0,5$  мин – длительность технологической паузы периодического охлаждения электролита в расчете на одну плату ГИС.

Расход металла  $M$  может быть оценен по уравнению [5]

$$M = \rho \cdot L_0 \cdot S_{\Sigma} \left( 1 + \frac{\alpha(S - S_{\Sigma})}{\pi \cdot r_0^2 \cdot K_Y^*} \right), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность металла;  $L_0$  – толщина покрытия;  $S$  – общая площадь топологии ГИС;  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий электрическую несвязность топологии ГИС, равный  $0 < \alpha < 1$ .

Для определения коэффициента  $\alpha$  можно воспользоваться статистическим анализом чертежей конструкторской документации плат ГИС в соответствии с формулой [5]

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \frac{(S_{ijk})^2}{S_i^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2P_i \cdot \delta_j}} \cdot \exp\left[ \frac{(S_{ij}^{-\alpha_i})^2}{2\delta_i^2} \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $i$  – номер платы;  $j$  – номер участка топологии платы;  $k$  – номер дефекта;  $S_i$  – площадь топологии  $i$ -й платы;  $S_{ij}$  – площадь  $j$ -го участка топологии  $i$ -й платы;  $S_{ijk}$  – площадь  $j$ -го участка топологии  $i$ -й платы, на которую попадает  $k$ -й дефект;  $S_i$  и  $\alpha_i$  – параметры нормального распределения Гаусса, рассчитываемые из соотношений:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{ij} - S_i)^2, \quad \alpha_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} \cdot P_j, \quad (4)$$

где  $S_j$  – средняя площадь топологии  $j$ -го участка топологии платы;  $P_j$  – вероятность появления  $j$ -го участка топологии в конструкции платы ГИС.

Периодичность смены электролита в электрохимической ячейке определяется исходя из предельного количества плат  $\Pi$ , обрабатываемых в одной порции раствора:

$$\Pi = \frac{C(C_0 - C_k)}{M} \cdot V_{я}, \quad (5)$$

где  $C_0$  и  $C_k$  – исходная и предельно допустимая концентрация соли металла в растворе электролита;  $C$  – содержание металла соли по массе;  $V_{я}$  – рабочий объем электрохимической ячейки;  $M$  – средний расход драгоценного металла на плату, мг.

Параметры процесса реставрации ГИС представлены в таблице.

Основные технические характеристики процесса лазерной электрохимической реставрации защитных покрытий ГИС

Параметр	Металл покрытия	
	золото	олово–висмут
Оптимальный катодный потенциал $E$ , В (н.в.э.)	-0,89	-0,76
Оптимальная интенсивность лазерного облучения $W$ , кВт/см <sup>2</sup>	21	21
Оптимальная скорость осаждения металла $j_0$ , мкм/мин	12,12	10,9
Оптимальный коэффициент лазерного ускорения $K_{\gamma}$	150	250
Разрешающая способность $r_0$ , мкм	30–35	28–32
Максимальный размер платы ГИС, мм	48×60	48×60
Погрешность, нанесения осадков, %	6–9	7
Предельный размер дефектов, мм	2–3	2–3
Характерная толщина покрытия $L_0$ , мкм	2	6
Средняя производительность труда, плат/ч	8	4
Средний расход драгоценного металла $M$ , мг/на одну плату	1,533	–
Рабочий объем ячейки $V_{я}$ , см <sup>3</sup>	60	60
Предельное количество плат, обрабатываемых в порции раствора, П	386	115

Из таблицы видно, что применение технологии лазерно-электрохимической реставрации может обеспечить годовую программу работ в объеме 8–10 тыс. шт. в расчете на одну установку. Средний расход электролита при этом составит всего 3 л. Расход драгоценного металла не превысит 20 г, что сопоставимо с потерями при регенерации золота из электролита после стравливания защитного покрытия бракованных плат ГИС.

Натурные испытания показали удовлетворительную микроструктуру и адгезию локальных лазерно-электрохимических осадков золота и сплава олово–висмут, свариваемость (золото) и паяемость этих осадков, а также устойчивость функциональных свойств локальных покрытий в условиях жестких термоциклов и сохранность номиналов тонкопленочных резисторов плат ГИС в оптимальных режимах лазерного электролиза.

Натурные испытания показали удовлетворительную микроструктуру и адгезию локальных лазерно-электрохимических осадков золота и сплава олово–висмут, свариваемость (золото) и паяемость этих осадков, а также устойчивость функциональных свойств локальных покрытий в условиях жестких термоциклов и сохранность номиналов тонкопленочных резисторов плат ГИС в оптимальных режимах лазерного электролиза.

### Заключение

Технология лазерно-электрохимического осаждения металлов излучением волоконных лазеров может быть использована не только для реставрации защитных покрытий планарных ГИС. Она перспективна и при изготовлении топологии непланарных специальных интегральных схем (СИС) электронных устройств предварительного усиления, размещаемых на корпусах антенн, датчиков, гироскопов, с целью достижения максимального отношения сигнал/шум. Такие СИС имеют высокую стоимость, что оправдывает применение лазерно-электрохимической технологии для их реставрации.

*Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Лазерные и оптические технологии» (Поволжский филиал), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», мероприятие 5.2. Развитие сети центров коллективного пользования научным оборудованием, ГК № 02.552.11.7021 (08.05.2007).*

### Список литературы

1. Никандрова Л.Н. Химические способы получения металлических покрытий. – Л.: Машиностроение, 1971. – 104 с.
2. Серянов Ю.В., Аравина Л.В. Лазерно-химические реакции для получения элементов ИЭТ // Обзоры по электронной технике. Серия 7. Технология, организация производства и оборудование. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1990. – Вып. 11 (1554). – 42 с.
3. Серянов Ю.В., Фоменко Л.А. Роль паровой кавитационной модуляции скорости реакций лазерного осаждения металлов // Электрохимия. – 1998. – Т. 73, № 5. – С. 1066–1071.
4. Puijpe J.Cl., Acosta R.E., Gutfeld R.J von. Investigation of laser-enhanced electroplating mechanisms // J. Electrochemical Society. – 1981. – Vol. 128, no. 12. – P. 2539–2545.
5. Серянов Ю.В., Фоменко Л.А., Соколова Т.Н., Чеботаревский Ю.В. Электрохимическая обработка металлов. – Саратов: Изд-во СГТУ, 1998. – 124 с.

## References

1. Nikandrova L.N. Khimicheskie sposoby polucheniia metalliches-kikh pokrytii [Chemical methods of metal coatings obtaining]. Leningrad: Mashinostroenie, 1971. 104 p.

2. Serianov Iu.V., Aravina L.V. Lazerno-khimicheskie reaktsii dlia polucheniia elementov IET [Laser chemical reactions for obtaining of elec-tronic devices elements]. *Obzory po elektronnoi tekhnike. Seriya 7. Tekhno-logiia, organizatsiia proizvodstva i oborudovanie*. Moscow: Elektronika, 1990, vol. 11 (1554). 42 p.

3. Serianov Iu.V., Fomenko L.A. Rol' parovoi kavitatsionnoi modulia-tsii skorosti reaktsii lazernogo osazhdeniia metallov [Role of the steam cavi-tation modulation of laser metal deposition reactions velocity]. *Elek-trokhimiia*, 1998, vol. 73, no. 5, pp. 1066-1071.

4. Puippe J.Cl., Acosta R.E., Gutfeld R.J von. Investigation of laser-enhanced electroplating mechanisms. *J. Electrochemical Society*, 1981, vol. 128, no. 12, pp. 2539-2545.

5. Seryanov Iu.V., Fomenko L.A., Sokolova T.N. Elektrokhimicheskaia obrabotka metallov [Metal Electrochemistry Treatment]. Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1998. 124 p.

Получено 15.09.2015