

Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2003. – № 2. – С. 30-31.

4. Пат. 2263649 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 04 В 41/88. Способ нанесения металлического покрытия на керамический элемент / Кумыков В.К., Гукетлов Х.М.; заявители и патентообладатели Кумыков В.К., Гукетлов Х.М., Гедгагова М.В., Жекамухов М.К. - №2003135115/03; заявл. 02.12.03; опубл. 10.11.05, Бюл. №31. – 5 с.

5. Гукетлов, Х.М. Влияние фотонного отжига на структуру и электрические свойства тонких металлических пленок на кремнии / Х.М. Гукетлов, А.В. Демченко, В.К. Кумыков, А.Р. Манукянц, В.М. Фетисова // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2006. – № 3. – С. 77-79

6. Кумыков, В.К. Математическое моделирование технологии металлизации керамики / В.К. Кумыков // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – № 4. – С. 586-588.

7. Пат. 2263650 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 04 В 41/90, С 04 В 41/88. Способ металлизации керамики / Кумыков В.К., Гукетлов Х.М.; заявители и патентообладатели Кумыков В.К., Гукетлов Х.М., Гедгагова М.В., Жекамухов М.К. - №2003135114/03; заявл. 02.12.03; опубл. 10.11.05, Бюл. №31. – 4 с.

8. Кумыков, В.К. Об одном способе металлизации керамики / В.К. Кумыков, М.М. Абазехов, М.В. Гедгагова, Х.М. Гукетлов // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Химия поверхности и нанотехнология». – СПб.: Изд-во СПбГТИ, 2006. – С. 186-188.

9. Пат. 2354632 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 04 В 41/90, С 04 В 41/91. Способ металлизации керамики / Созаев В.А., Кумыков В.К., Сергеев И.Н., Гукетлов Х.М., Гедгагова М.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова. - №2007106359/03; заявл. 19.02.07; опубл. 10.05.09, Бюл. №13. – 5 с.

УДК 621.36:539.216.2:669.782

## К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ СТЕФАНА ДЛЯ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИКИ

В.К. Кумыков

*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,  
360000, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, kumtykov@hotmail.com*

В работе проводится анализ решения задачи Стефана с фазовыми превращениями для модели процесса металлизации керамики пучком некогерентного светового излучения. Задача, в которой керамическая подложка вместе с нанесенной на ее поверхность металлосодержащей пастой рассматривается как плоская двухслойная среда, простирающаяся в бесконечность, решается квазистационарным методом Лейбинсона.

Создание тонких высокоадгезионных металлических покрытий на керамических подложках является одной из актуальных задач микроэлектроники. Высокие требования, предъявляемые как к металлическому покрытию, так и к подложке, накладывают существенные ограничения по времени отжига поверхности керамики, покрытой металлосодержащей пастой. При этом технология отжига должна обеспечить испарение композиционной присадки с одновременным наплавлением металлической пленки в течение малого промежутка

времени, в течение которого заметного нагрева керамики, приводящего к ухудшению ее диэлектрических свойств, не происходит.

В [1-3] предложены технологические решения, удовлетворяющие указанным требованиям. Наиболее удачным из них является метод, описанный в [2]. Его сущность состоит в вакуумном отжиге керамической подложки с металлосодержащей пастой, при котором нагрев металлизуемой поверхности осуществляется за счет кратковременного (доли секунды) облучения подложки мощным источником теплового излучения, расположенным вне рабочего объема. Световой пучок, проходя в вакуумную камеру через иллюминатор с собирающей линзой, фокусируется на подложке со стороны технологического покрытия, наплавляя металл на поверхность подложки. Разработанный метод обеспечивает получение высокоадгезионного металлического покрытия без заметного нагрева подложки и загрязнения рабочего объема камеры.

Для теоретического описания технологического процесса металлизации в [4,5] была разработана математическая модель, в которой керамическая подложка с нанесенной на ее поверхность металлосодержащей пастой рассматривается как плоская двухслойная среда, простирающаяся в бесконечность. Такое допущение было сделано в связи с тем, что диаметр керамической подложки, изготовленной в виде таблетки, существенно превосходит ее толщину. При этих условиях влиянием боковых границ на теплофизические процессы, протекающие в двухслойной среде, можно пренебречь.

Математическая задача о металлизации керамики относится к типу задач с фазовыми превращениями (задача Стефана), в которых определяется температурное поле в областях с подвижными границами раздела фаз, а также устанавливается закон перемещения этих границ.

Наиболее эффективным методом решения задач указанного типа является квазистационарный метод Лейбинсона, в котором предполагается, что температурные поля как в керамической подложке, так и в металлосодержащей пасте близки к стационарным.

Для координаты фронта испарения композиционной присадки  $\xi(t)$  в [4] получено уравнение

$$\xi - \frac{\lambda_2(T_{nn} - T_0)}{q(1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1})} \ln \left[ 1 - \frac{\xi(1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1})}{H + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}h - \frac{\lambda_2}{q}(T_{nn} - T_0)} \right] = \frac{q}{\rho L} t. \quad (1)$$

Здесь  $q$  – интенсивность светового потока,  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности металлосодержащей пасты,  $h$  – ее толщина,  $T_{nn}$  – температура плавления металла, содержащегося в пасте,  $T_0$  – температура границы раздела подложки и пасты,  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности

керамической подложки,  $H$  – ее толщина,  $\rho$  – ее плотность,  $L$  – удельная теплота, состоящая из двух слагаемых – удельной теплоты плавления частиц металлического порошка, содержащегося в пасте, и удельной теплоты испарения композиционной присадки:

$$\rho L = \gamma \rho_{\kappa} L_{ucn} + (1 - \gamma) \rho_{\mu} L_{nl},$$

где  $\gamma$  – доля композиционной присадки в пасте,  $L_{ucn}$  – ее удельная теплота испарения,  $L_{nl}$  – удельная теплота плавления металла,  $\rho_{\kappa}$  и  $\rho_{\mu}$  – плотности композиционного материала и металла соответственно. В условиях эксперимента  $\gamma \approx 1$  т.е.  $\rho L \approx \rho_{\kappa} L_{ucn}$ .

В момент полного испарения композиционного материала, т.е. при  $t = \tau$  величина  $\xi = h$ . При этом из равенства (10) следует:

$$\tau = \frac{\rho L h}{q} \left[ 1 - \frac{\lambda_2 (T_{nl} - T_0)}{q h (1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1})} \ln \left( 1 - \frac{h (1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1})}{H + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} h - \frac{\lambda_2}{q} (T_{nl} - T_0)} \right) \right]. \quad (2)$$

Принимая во внимание, что  $\frac{h}{H} \ll 1$  и, следовательно, второе слагаемое под логарифмом значительно меньше единицы, получим

$$\tau = \frac{\rho L h}{q} \left[ 1 + \frac{\lambda_2 (T_{nl} - T_0)}{H q} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{h}{H} - \frac{\lambda_2 (T_{nl} - T_0)}{H q}} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $q_2 = \frac{\lambda_2 (T_{nl} - T_0)}{H}$  – поток тепла в объем керамической подложки.

Следовательно, можно записать

$$\tau \cong \frac{\rho L h}{q} \left[ 1 + \frac{q_2}{q} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{h}{H} - \frac{q_2}{q}} \right]. \quad (4)$$

При выводе формулы (1) предполагалось, что поток световой энергии полностью поглощается поверхностью металлосодержащей пасты. В действительности часть падающей энергии отражается, поэтому  $q$  надо заменить на  $q' = q(1 - k_0)$ , где  $k_0$  – коэффициент отражения. При этом формула (4) принимает вид

$$\tau = \frac{\rho L h}{q(1 - k_0)} k, \quad (5)$$

$$\text{где } k = 1 + \frac{q_2}{q(1-k_0)} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{h}{H} - \frac{q_2}{q(1-k_0)}} \approx 1 + \frac{q_2}{q(1-k_0)} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{h}{H}}.$$

При  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  и  $\frac{h}{H} \ll 1$  последнее выражение упростится:

$$k = 1 + \frac{q_2}{q(1-k_0)}. \quad (6)$$

Таким образом, коэффициент  $k$  учитывает влияние потока тепла внутрь керамической подложки на длительность процесса покрытия подложки металлической пленкой. Чем больше отношение тепловых потоков  $\frac{q_2}{q(1-k_0)}$ , тем продолжительнее процесс металлизации керамики.

Вместе с тем, в [4,5] для времени  $\tau$  приводится формула  $\tau = \frac{kQ\rho h}{q(1-k_0)}$ ,

где ошибочно считается, что  $k$  – коэффициент отражения, а  $k_0$  – эмпирический коэффициент порядка 1,2 в условиях эксперимента. На самом деле  $k$  – эмпирический коэффициент, который на основе теоретических расчетов уже определяется формулой (6), а  $k_0$  – коэффициент отражения.

Таким образом, практически значения  $\tau$ , определяемые формулой (6) и на основе экспериментальных измерений, совпадают, т.е. физический смысл коэффициента  $k$  теоретическим путем полностью раскрыт с той оговоркой, что  $\rho Q \approx \rho_n L_{исп}$ , т.е. процесс металлизации керамической подложки определяется не плавлением частиц металла, а испарением пасты.

### Библиографический список

1. Пат. 2354632 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 04 В 41/90, С 04 В 41/91. Способ металлизации керамики / Созаев В.А., Кумыков В.К., Сергеев И.Н., Гукетлов Х.М., Гедгагова М.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова. - №2007106359/03; заявл. 19.02.07; опубл. 10.05.09, Бюл. №13. – 5 с.
2. Пат. 2263649 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 04 В 41/88. Способ нанесения металлического покрытия на керамический элемент / Кумыков В.К., Гукетлов Х.М.; заявители и патентообладатели Кумыков В.К., Гукетлов Х.М., Гедгагова М.В., Жекамухов М.К. - №2003135115/03; заявл. 02.12.03; опубл. 10.11.05, Бюл. №31. – 5 с.
3. Пат. 2263650 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 04 В 41/90, С 04 В 41/88. Способ металлизации керамики / Кумыков В.К., Гукетлов Х.М.; заявители и патентообладатели Кумыков В.К., Гукетлов Х.М., Гедгагова М.В., Жекамухов М.К. - №2003135114/03; заявл. 02.12.03; опубл. 10.11.05, Бюл. №31. – 4 с.
4. Кумыков, В.К. Математическое моделирование технологии металлизации керамики / В.К. Кумыков // Известия РАН. Серия физическая. – 2008. – № 4. – С. 586-588.

5. Кумыков, В.К. О моделировании процесса металлизации керамики в условиях вакуума / М.К. Жекамухов, М.К. Кумыков // Труды IX международного симпозиума «Порядок, беспорядок и свойства оксидов». 19-23 сентября 2006 г. - Ростов н/Д: ИПО ПИ ЮФУ, 2006. – С. 191-194.

УДК 544.7

## **СОРБЦИЯ ШЕСТИВАЛЕНТНОГО ХРОМА ИЗ ВОДНОГО РАСТВОРА ЧАСТИЦАМИ НАНОРАЗМЕРНОГО МАГНЕТИТА**

О.Д. Линников, И.В. Родина, В.Г. Шевченко, А.Е. Ермаков\*, И.В. Медведева\*, А.А. Мысик\*, М.А. Уймин\*, Н.Н. Щеголева\*, В.В. Платонов\*\*, В.В. Осипов\*\*

*Институт химии твердого тела УрО РАН,*

*620999, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91, linnikov@mail.ru*

*\*Институт физики металлов УрО РАН, 620041, Екатеринбург, ул. С.Ковалевской, 18*

*\*\*Институт электрофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106*

Изучена сорбция шестивалентного хрома наноразмерным магнетитом, полученным тремя разными методами. Показано, что магнетит является эффективным сорбентом для удаления шестивалентного хрома из загрязненных природных и сточных вод. Обнаружено, что даже небольшое повышение температуры раствора при проведении процесса сорбции резко увеличивает его эффективность.

Очистка природных и сточных вод от шестивалентного хрома представляет собой чрезвычайно важную задачу в виду его высокой токсичности. Одним из перспективных способов удаления Cr(VI) из растворов является сорбционный метод. Главное достоинство сорбционного метода очистки заключается в том, что он практически не вносит в очищаемый раствор новых, посторонних, ионов и веществ. Это позволяет использовать его для регенерации ряда технологических растворов (например, в гальванике), а также для очистки загрязненных природных вод для последующего использования в коммунальном хозяйстве.

Сорбционная емкость сорбентов в значительной степени определяется их удельной поверхностью, которая возрастает при уменьшении размера частиц сорбента. Однако при этом, соответственно, усложняются процессы отделения сорбента от раствора традиционными методами отстаивания и фильтрования. Поэтому важной задачей является получение сорбентов, которые: (1) обладают хорошими сорбционными свойствами и (2) легко отделяются от раствора. Эта задача может быть решена, если в качестве сорбента использовать порошок из малых ферромагнитных частиц, которые после сорбции загрязнителей могут быть отделены от раствора под действием градиентного магнитного поля. Одним из примеров ферромагнитного сорбента является магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

В данной работе изучен процесс сорбции шестивалентного хрома