

Наибольший эффект достигается при стимулировании химического взаимодействия плазмой тлеющего разряда с контролируемыми параметрами. Синтез оксидной керамики аморфной металлической матрицы в атмосфере окисляющих газов является заключительным этапом структуризации покрытий.

Таким образом, при синтезе возможно получение как аморфной, так и кристаллической структуры керамики. Синтез керамики с аморфной структурой позволяет управлять полнотой и скоростью протекания реакции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев В.А., Фигурин Б.Л., Фигурин К.Б. Плазмоактивированный синтез однофазных аморфных керамических пленок в условиях реактивного магнетронного разряда // Прогрессивные технологии обработки материалов: Мат-лы междунар. конф. Мн., 1998. С. 167–168.
2. Дураченко А.М., Кахнаишвили М.В. Кристаллизация аморфных пленок // Аморфные металлические материалы. М.: Наука, 1984. С. 87–90.
3. Фигурин К.Б. Исследование процессов девитрификации аморфных пленок титанов // Технич. вузы – республике. Мат-лы междунар. науч.-техн. конф. Мн., БГПА, 1997. С. 168.

УДК 666.3

Е.С. ГОЛУБЦОВА, канд. техн. наук,
Б.А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук (БНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ SiC-КЕРАМИКИ

Уровень электропроводности SiC-керамики, закон ее изменения с ростом температуры, тип проводимости зависят от концентрации электрически активных (донорных или акцепторных) примесей, растворенных в решетке, от других фазовых составляющих, их содержания и характера распределения (микроструктуры).

В работе [1] высказано мнение, что если материалы представляют собой зерна карбида кремния (SiC), цементированные оксидными связками, то электропроводность определяется в основном свойствами связки.

Для проверки этого суждения был проведен двухфакторный эксперимент типа 4×4, где 4 – четыре уровня вида связки (1 – глинистая, 2 – муллитовая, 3 – муллито-корундовая, 4 – корундовая) и четыре уровня температуры (600, 900, 1000 и 1100 °С).

В качестве параметра оптимизации было выбрано электросопротивление ρ , Ом·м, а в качестве факторов – связка (x_1) и температура.

Матрица плана и результаты эксперимента приведены в табл. 1. Здесь y – параметр оптимизации (ρ); x_1 и x_2 – кодированные уровни факторов (–1;

$-1/3; +1/3; +1$). Ошибка воспроизводимости (опыта) составляла 0,009; критерий Стьюдента $t = 2,12$.

Таблица 1

План эксперимента 4×4 и результаты опытов

Номер опыта	x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	y_s	\hat{y}
1	-	-	-	+	+	0,0500	0,0460
2	-	-1/3	+1/3	+	1/9	0,0250	0,0260
3	-	+1/3	-1/3	+	1/9	0,0125	0,0990
4	-	-	-	+	+	0,0000	0,0100
5	-1/3	-	+1/3	1/9	+	0,2250	0,2380
6	-1/3	-1/3	+1/9	1/9	1/9	0,1250	0,0750
7	-1/3	+1/3	-1/9	1/9	1/9	0,0625	0,0010
8	-1/3	+	-1/3	1/9	+	0,0250	0,0200
9	+1/3	-	-1/3	1/9	+	0,3500	0,5000
10	+1/3	-1/3	-1/9	1/9	1/9	0,2130	0,2420
11	+1/3	+1/3	+1/9	1/9	1/9	0,1000	0,0740
12	+1/3	+	+1/3	1/9	+	0,0375	0,0290
13	+	-	-	+	+	1,0000	0,8350
14	+	-1/3	-1/3	+	1/9	0,3500	0,4800
15	+	+1/3	+1/3	+	1/9	0,1750	0,2100
16	+	+	+	+	+	0,0750	0,0550
Σ	1,6	-1,61	-1,085	1,814	1,881	2,8255	

После расчета коэффициентов уравнения регрессии, проверки их значимости и адекватности уравнения по методике, изложенной в работе [2], оно приобрело следующий вид:

$$y = 0,079 + 0,18x_1 - 0,181x_2 - 0,22x_1x_2 + 0,077x_1^2 + 0,098x_2^2. \quad (1)$$

Из уравнения (1) видно, что оба фактора (связка и температура) оказывают примерно одинаковое влияние на электросопротивление керамики из SiC. Из него следует также, что электросопротивление y растет по мере перехода от глинистой связки к корундовой. Обращает на себя внимание большая роль взаимодействия ($b_{12} = -0,22$) уровня связки и температуры. Подставив в уравнение (1) различные кодированные уровни связок ($-1; -1/3; +1/3; +1$), получим частные уравнения:

$$y_1 = 0,098x_2^2 + 0,039x_2 - 0,024; \quad y_2 = 0,098x_2^2 - 0,111x_2 + 0,028;$$

$$y_3 = 0,098x_2^2 - 0,251x_2 + 0,148; \quad y_4 = 0,098x_2^2 - 0,401x_2 + 0,336,$$

из которых видно, что наиболее высокие значения электросопротивления будут у SiC на корундовой связке (при $x_2 = -1, t = 800^\circ\text{C}$), являющейся хорошим электроизолятором. Поэтому уровень электросопротивления материалов этого типа весьма высок.

С ростом температуры ($x_2 \rightarrow +1$) значения электросопротивления для всех материалов падают и при $t \approx 1100^\circ\text{C}$ ($x_2 = +1$) становятся близкими, что характерно для фаз с химической связью ионного типа.

Электропроводность реакционно-спеченного SiC, имеющего матричную структуру, в меньшей степени зависит от других фазовых составляющих (кремния и углерода) и определяется в первую очередь свойствами карбидо-кремниевого каркаса, состоящего из первичного и вторичного SiC.

В самосвязанном материале, содержащем SiC' и SiC'', электрические характеристики этих фаз зависят от условий реакционного спекания.

Для поиска оптимальных условий получения материалов при различных температурах и времени спекания был проведен полнофакторный эксперимент 2^k , где 2 – два уровня факторов, а k – количество факторов (в нашем случае $k = 2$).

В качестве параметров оптимизации были выбраны: y_1 – доля карбида кремния в спеченном материале, % (по объему); y_2 – электросопротивление ρ , Ом · м; y_3 – пористость, % (по объему). В качестве факторов были выбраны время спекания (60 и 120 мин) и температура спекания (2100 и 2300 °С). Матрица плана и результаты эксперимента приведены в табл. 2. Ошибки опытов соответственно составили: $S_1 = 0,6$, $S_2 = 5$ и $S_3 = 0,7$.

Таблица 2

Матрица полнофакторного эксперимента 2^k

Номер опыта	x_1	x_2	x_1x_2	y_1	\hat{y}_1	y_2	\hat{y}_2	y_3	\hat{y}_3
1	–	–	+	62	62	6,7	6,7	10,1	10,1
2	–	+	–	62	62	23,7	23,7	11,4	11,4
3	+	–	–	60,4	60,4	170,4	170,4	12,7	12,7
4	+	+	+	70	70	203,7	203,7	22,2	22,2
Σ_1	6,4	9,6	9,6	254,4					
Σ_2	343,7	50,3	16,3			404,5			
Σ_3	13,4	10,8	8,2					56,4	

После обработки результатов по методике, изложенной в [3], и проверки значимости коэффициентов получены адекватные уравнения:

$$y_1 = 63,6 + 1,6x_1 + 2,4x_2 + 2,4x_1x_2;$$

$$y_2 = 101,13 + 85,93x_1 + 12,58x_2 + 4,08x_1x_2;$$

$$y_3 = 14,1 + 3,35x_1 + 2,7x_2 + 2,05x_1x_2.$$

Как следует из этих уравнений, содержание SiC возрастает с увеличением времени и температуры спекания, так же как и электросопротивление и пористость.

Исходя из полученных результатов и используя технологию реакционного спекания, можно получить материалы с проводимостью n - и p -типа с меняющимся в широких пределах электросопротивлением (от 6,7 до 203,7 Ом·м), что важно для создания элементов электротехнических устройств, например электронагревателей, варисторов, электродов и др. [1].

Определенный интерес представляет выявление корреляционной связи между исследуемыми параметрами. Для этого определяли коэффициент парной корреляции r_{ij} по формуле

$$r_{ij} = \frac{\sum \Delta y_i \Delta y_j}{\sqrt{\sum \Delta y_i^2 \sum \Delta y_j^2}}, \quad (2)$$

где Δy_i , Δy_j – разность между текущим (i -м) и средним значением i -го (или j -го) параметра.

В результате были получены следующие значения этих коэффициентов: $r_{1,2} = 0,544$, $r_{1,3} = 0,94$ и $r_{2,3} = 0,797$ при табличном (критическом) значении $r_{кр} = 0,8114$ (для $\alpha = 0,05$ и $f_1 = 4$).

Таким образом, линейная корреляция существует между количеством связанного карбида кремния (y_1) и пористостью (y_3) и близка к линейной корреляции между электрическим сопротивлением (y_2) и пористостью (y_3).

Связь между y_1 и y_3 можно выразить в виде линейного корреляционного уравнения

$$y_3 = 1,19y_1 - 61,58.$$

Следовательно, зная значение пористости (y_3), можно определить долю связанного карбида кремния, и наоборот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неметаллические тугоплавкие соединения / Г.Я. Косолапова, Т.В. Андреева, Т.С. Бартицкая и др. М.: Металлургия, 1985. 224 с.
2. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 1981. 264 с.
3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.

УДК 669.3

Е.С. ГОЛУБЦОВА, канд. техн. наук (БНТУ)

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ

Современное развитие многих отраслей промышленности базируется на последних достижениях экономики, требованиях безопасности и рациональности в производстве, а также экологичности. Эта тенденция распространяется как на производственные условия, процессы и оборудование, так и на применяемые и создаваемые материалы.

Разработка и внедрение новых конструкционных материалов является одной из наиболее характерных тенденций развития современной техники. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, прово-