ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ НАНОФОЛЬГИ Ni-Al С ЭФФЕКТОМ СВС

И.А. Корж

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Приведена методика определения температуры горения в нанопленках Ni-Al. Определена температура горения, которая находится на уровне известных данных в пределах 1300–1500 °C.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, температура горения, нанопленки Ni-Al.

DETERMINATION OF BURNING TEMPERATURE NANOFOLGS Ni-Al WITH SHS EFFECT

I.A. Korzh

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

Method for determining the combustion temperature in Ni-Al nanofilms is presented. The combustion temperature is determined, which is at the level of known data in the range of 1300–1500 °C.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, combustion temperature, Ni-Al nanofilms.

Введение

Нанопленки Ni-Al с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) нашли применение в электронике при соединении компонентов методом пайки, чувствительных к температурным воздействиям (пьезоэлементов с низкой температурой Кюри, различных МЭМС устройств). Одними из параметров нанопленок являются температура горения и скорость распространения фронта горения. Температура горения является важнейшей характеристикой нанопленок. Чем выше температура горения, тем тоньше может быть фольга на основе таких нанопленок для использования в качестве элемента присоединения термочувствительных компонентов, а также может быть использован припой (наносимый на поверхность фольги) с более высокой температурой плавления. На рис. 1 показан процесс горения нанофольги торговой марки NanoFoil фирмы Indium Corp. [3].

Инициирование начала процесса СВС (начала горения) нанофольги производят различными способами:

- искрой от источника напряжения (5 В и более);
- лазерным лучом;
- нагревом (от 300 °C);
- механическим воздействием.

Инициирование обычно проводится локальным воздействием на край нанофольги. После инициирования фольга вспыхивает, и ее температура в течение наносекунд повышается до 1500 °C и выше (в зависимости от состава нанопленки).

В настоящее время температуру горения фольги определяют при помощи высокоскоростных тепловизоров и различных устройств с применением традиционных термопар. Недостатками таких способов являются высокая стоимость тепловизоров и недостоверность результатов при использовании термопар из-за высокой скорости горения фольги (несколько миллисекунд).

Рис. 1. Процесс горения нанофольги

Цель работы – разработка простого, доступного способа определения температуры горения в нанопленках Ni-Al и определение температуры в пленках, изготавливаемых нами.

Методика эксперимента, результаты и их обсуждение

Исследовались нанопленки Ni-Al, полученные магнетронным распылением соответствующих мишеней в вакуумной установке SEMITEG. Толщина пленок составляла 20 мкм. Такие толщины пленок принято называть фольгой. Из фольги нарезались узкие полоски, 3–5 мм шириной и длиной 26–65 мм, которые соединялись с источником питания и нагрузочным резистором (рис. 2).

Рис. 2. Схема для определения температуры горения Ni-Al фольги

На вход схемы подавалось напряжения $U_0 = 0,3 \text{ В}$. Измерялись значения напряжения на СВС полоске (фольге) и тока, проходящего через нее до инициирования и после инициирования СВС процесса. Инициирование СВС процесса осуществлялось при помощи открытого пламени (от факела зажигалки) – по длине полоски распространялась ярко светящаяся волна безгазового горения, в результате чего происходил сам СВС процесс. Полоска вспыхивала, сопротивление ее изменялось. Это изменение сопротивления фиксировалось запоминающим осциллографом. Цифровой запоминающий осциллограф KEYSIGHT Infinii Vision DSO-X3032A. Источник питания постоянного тока U3606A фирмы Agilent Technologies. На рис. 3 показаны фотографии прореагировавших полосок фольги Ni-Al.

Рис. 3. Прореагировавшие полоски фольги Ni-Al

Полоски нагревались в процессе СВС и происходило их сморщивание.

Воспользуемся известной формулой для определения сопротивления резистора при его нагреве $R_t = R_x(1 + \alpha(t_{\text{СВС}} - t_0))$. Здесь t_0 – начальная температура при проведении эксперимента (в нашем случае 25°C); $t_{\text{СВС}}$ – температура горения фольги, которую необходимо определить; α – ТКС фольги, который также необходимо определить; R_x – сопротивление полоски фольги до начала СВС; R_t – сопротивление полоски фольги по окончании СВС.

Во время СВС процесса сопротивление увеличится на величину $R_x\alpha(t_{\text{СВС}} - t_0)$. Отсюда температура СВС процесса будет $t_{\text{СВС}} = t_0 + (R_t - R_x)/R_x\alpha$. Для определения температуры процесса необходимо знать значение ТКС фольги Ni-Al.

Определение ТКС производили по методике, приведенной нами в [1]. Фольгу никель-алюминий толщиной 1 мкм напыляли на керамические подложки, после чего производили температурные измерения. На рис. 4 приведена зависимость поверхностного сопротивления фольги Ni-Al от ее температуры.

Рис. 4. Зависимость сопротивления квадрата сопротивления пленки Ni-Al от температуры

ТКС фольги никель-алюминий, определенный на основе данных рис. 4, составил $3,125 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$. В табл. 1 приведены результаты проведенных экспериментов по СВС фольги Ni-Al.

Таблица 1

Результаты экспериментов по определению температуры горения фольги Ni-Al

<i>N_о</i> <i>образца</i>	<i>L</i> , <i>мм</i>	<i>d</i> , <i>мкм</i>	<i>U_о</i> , <i>В</i>	<i>I_о</i> , <i>мА</i>	<i>U_x</i> (до СВС), <i>мВ</i>	<i>I_{свс}</i> , <i>мА</i>	<i>U_{свс}</i> , <i>мВ</i>	<i>R_x</i> , <i>Ом</i>	<i>R_t</i> , <i>Ом</i>	<i>t_{свс}</i> , <i>°С</i>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
9	26	20	0.3	251	13,2	251	65	0,053	0,302	1528
10	26	20	0.3	268	13,8	231	65	0,051	0,281	1468
11	55	20	0.3	251	27,6	194	114	0,11	0,59	1421
12	47	20	0.3	257	16,8	215	86	0,065	0,40	1674
13	65	20	0.3	248	33,4	181	128	0,135	0,707	1380

Среднее значение из 5 результатов измерений составляет 1394 °С. Было проведено сравнение полученного результата с известными литературными данными. В работе [2] для нанофольги Ni/Al (мольное отношение 1:1) приведено значение максимальной температуры при экзотермической реакции и измеренная при помощи вольфрам-рениевой термодомы, которая составила 1700±50 К (1422±50 °С).

Известный производитель нанофольги Indium Corporation [3] приводит для фольги Ni/Al (1:1) значение температуры реакции в диапазоне 1350 °С – 1500 °С.

Таблица 2

Сводные значения по температуре горения фольги Ni-Al

<i>Фольга</i>	<i>Температура горения фольги, °С</i>	<i>Литература</i>
Ni-Al (мольное отношение 1:1)	1422±50	2
Ni-Al (отношение 1:1)	1350–1500	3
Ni-Al (отношение 1:1 по толщине нанослоев)	1394	Собственные данные

Как следует из табл. 2, наши данные по температуре горения фольги Ni-Al близки к значениям, полученным другими исследователями.

Заключение

Представлена методика определения температуры горения фольги Ni-Al на основе использования известной формулы изменения сопротивления резистивной пленки (полоски фольги) от температуры $R_t = R_x(1 + \alpha(t_{свс} - t_o))$.

Определена температура горения фольги Ni-Al, равная 1394 °С, что хорошо коррелирует с известными данными (1350–1500) °С.

Представленная методика может быть использована при отработке технологии изготовления фольги с эффектом СВС (как инструмент сравнения при изменении технологических параметров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корж И.А. Экспресс-метод определения температурного коэффициента тонких резистивных пленок. Современное состояние и перспективы развития специальных систем радиосвязи и радиоуправления // Современное состояние и перспективы развития специальных систем радиосвязи и радиоуправления: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Омск, 2018. С. 274–279.
2. Structure evolution and reaction mechanism in the Ni/Al reactive multilayer nanofolils / A.S. Rogachev [et al.] // Acta Materiala, 2014, 66, 89–96.
3. URL: www.Indium.com.