ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ГОРЕНИЯ В НАНОПЛЕНКАХ Ni-Al ПРИ ПРОВЕДЕНИИ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

И.А. Корж, А.Н. Кузнецов

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Приведена методика определения скорости распространения фронта горения в нанопленках Ni-Al. Определены скорости, которые находятся на уровне известных данных в пределах 1,7–3,25 м/с.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, скорость распространения фронта горения, нанопленки Ni-Al.

STUDY OF THE PROPAGATION VELOCITY OF THE COMBUSTION FRONT IN Ni-Al NANOFILMS DURING SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

I.A. Korzh, A.N. Kuznetsov

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

A technique is given for determining the propagation velocity of the combustion front in Ni-Al nanofilms. Velocities that are at the level of known data in the range of 1,7–3,25 m/s are determined.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, propagation velocity of the combustion front, 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, например, при соединении пьезоэлементов с низкой температурой Кюри, а также присоединении различных МЭМС устройств к основанию корпуса. Важнейшими параметрами нанопленок являются температура воспламенения и скорость распространения фронта горения. Скорость распространения фронта горения является одной из основных характеристик, влияющих на качество соединения компонентов пайкой. Чем выше скорость распространения фронта горения, тем меньше температурные воздействия на соединяемые компоненты.

В настоящее время одним из способов определения скорости распространения фронта горения является использование высокоскоростных видеокамер. Недостатком такого способа является дороговизна используемого оборудования. Цель работы – разработка простого, доступного способа определения скорости распространения фронта горения в нанопленках Ni-Al и определение скорости в пленках, изготавливаемых нами.

Методика эксперимента

Исследовались нанопленки Ni-Al, полученные магнетронным распылением соответствующих мишеней в вакуумной установке SemiTEq STE MS900. Толщина пленок составляла от 12 до 50 мкм. Такие толщины пленок принято называть фольгой. Из фольги нарезались полоски длиной 30–50 мм, которые соединялись с источником питания и нагрузочным резистором (рис. 1).

Рис. 1. Схема для определения скорости распространения фронта горения Ni-Al фольги

К нагрузочному резистору R_n подсоединялся запоминающий осциллограф. На вход схемы подавалось напряжение 0,3 В. 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-X 3032A. Источник питания постоянного тока U 3606A фирмы Agilent Technologies. Скорость распространения определялась как

$$V = \frac{l}{t}, \quad (1)$$

где l – длина полоски СВС фольги, t – время горения полоски. Типичная осциллограмма СВС процесса показана на рис. 2.

Рис. 2. Осциллограмма распространения фронта горения при проведении СВС процесса

Из рис. 2 видно, что, когда начинается СВС по длине фольги, происходит увеличение сопротивления полоски фольги, при этом напряжение на нагрузочном резисторе уменьша-

ется. По завершении процесса горения сопротивление полоски фольги стабилизируется и напряжение на резисторе также стабилизируется. Время горения определяется между двумя уровнями напряжения на осциллограмме.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные СВС процесса Ni-Al фольги

№ обр	d , мм	U_0 , В	I_0 , мА	$I_{свс}$, мА	ΔU , мВ	l , мм	t , мс	V , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	20	0,3	680		60	30	17-18	1,67
А	20	0,3	720	493	70	30	18	1,67
А	20	0,3	480	350	40/60	45	26	1,73
В	15	0,3	480	370	50	40	20	2,0
В	15	0,3	380	366	25	40	18	2,22
В	15	0,3	520	370	50	40	18	2,22
С	50	0,3	590		15	35	10	3,25
С	50	0,3	750	590	30	30	19	1,58
С	50	0,3	750		30	30	10	3,0
Д	30	0,3	700	409	60	33	12	2,75
Д	30	0,3	665	430	30	35	12	2,92
Д	30	0,3	720	460	20	31	12	2,58
Е	12	0,3	640	313	80	45	21	2,14
Е	12	0,3	660	330	75	45	23	1,96
Е	12	0,3	637		80	50	30	1,67
Е	12	0,3	605	286	80	46	25	1,84

Здесь d – толщина фольги, U_0 – входное напряжение, I_0 – входной ток до СВС процесса, $I_{свс}$ – ток по завершении СВС процесса, ΔU – падение напряжения на СВС. Средние значения скорости распространения фронта горения: А – 1,70 м/с, В – 2,15 м/с, С – 3,25 м/с, Д – 2,75 м/с, Е – 1,81 м/с. На рис. 3 показана зависимость скорости распространения фронта горения от толщины фольги Ni-Al.

Рис. 3. Зависимость скорости горения фольги Ni-Al от ее толщины

Как следует из рис. 3, с увеличением толщины фольги Ni-Al от 12 до 50 мкм скорость распространения фронта горения увеличивается почти в 2 раза, от 1,7 до 3,25 м/с. При этом температура поверхности фольги доходит до температуры плавления никеля – 1453 °С. В литературе приведены сведения по скорости распространения фронта горения различных типов фольги. Проведем сравнение с нашими результатами с наиболее широко исследуемыми типами фольги Ni-Al и Ti-Al. В табл. 2 приведены сравнительные данные по скорости распространения фронта горения этих фольг.

Таблица 2

Скорости распространения фронта горения нанофольги

<i>Фольга</i>	<i>Способ получения</i>	<i>d, мкм</i>	<i>V, м/с</i>	<i>Литература</i>
Ni-Al	прокат порошков	До 100	0,15	[1]
Ni-Al	напыление	5	0,62–1,96	[2]
Ti-Al	напыление	21	1,5	[3]
Ti-Al	напыление	28	0,08	[2]
Ni-Al	напыление	40–100	6,5–8	[4]
Ni-Al	напыление	12–50	1,7–3,25	наши результаты

Наиболее высокие скорости горения получены фирмой-производителем нанофольги Indium Corporation [4]. Для фольги Ni/Al (1:1) скорость составляет 6,5–8 м/с.

Как видно из табл. 2, пленки Ni-Al, полученные нами, не уступают по скоростям распространения фронта горения пленкам, известным по литературе.

Заключение

Предложена методика определения скорости фронта горения в нанопленках Ni-Al на основе использования запоминающего осциллографа. Проведены эксперименты по определению скорости фронта горения Ni-Al фольги с толщинами от 12 до 50 мкм. Они равны 1,7–3,25 м/с. Показано, что скорости фронта горения фольги, полученные нами, близки к скоростям, полученным другими исследователями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ получения многослойных энерговыделяющих наноструктурированных пленок для неразъемного соединения материалов: пат. 2479382 РФ / Вадченко С.Г., Рогачев А.С.; заявитель и патентообладатель ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения» РАН. № 2012107273/02; заявл. 29.02.2012; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11.
2. Adams D.P. Reactive multilayers fabricated by vapor deposition: a critical review // Thin Solid Films. 2015. Vol. 576, pp. 98–128.
3. Рогачев А.С., Мержанов А.Г. Безгазовое горение многослойных биметаллических нанопленок Ti/Al // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, №2. С. 45–51.
4. Характеристики материала Nanofoil. URL: www.indium.com/nanofoil/properties.