РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩИХСЯ НАНОПЛЕНОК С ЭФФЕКТОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

И.А. Корж, Ю.С. Зонова

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Проведен анализ литературы по получению свободных, самоподдерживающихся нанопленок с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Приведены результаты экспериментов по получению Ni-Al фольги на различных подложках. Показано, что наилучшие параметры нанопленок (фольги) Ni-Al получаются на стеклянных подложках со слоем меди, фольгированным медью полиимиде и латунных подложках.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, нанопленки, фольга Ni-Al, технология получения самоподдерживающихся нанопленок.

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR PRODUCING SELF-SUPPORTING NANO FILMS WITH THE EFFECT OF SELF-DISTRIBUTING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

I.A. Korzh, Yu.S. Zonova

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

The literature is analyzed on the production of free, self-sustaining nanofilms with the effect of self-propagating high-temperature synthesis. The results of experiments on the production of Ni-Al foils on various substrates are presented. It is shown that the best parameters of Ni-Al nanofilms (foils) are obtained on glass substrates with a layer of copper, copper foil polyimide and brass substrates.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, nanofilms, Ni-Al foil, technology for the production of self-supporting nanofilms.

Введение

В последние годы большое внимание привлекли к себе реактивные многослойные материалы, изготовленные путем вакуумного напыления. Это так называемые нанопленки с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Нанопленки типа Ni-Al (Ni/Al) с большим количеством слоев (до 500 и более) называются фольгой с эффектом СВС. Эта фольга разработана и успешно применяется для локализованной пайки чувствительных к температуре компонентов. Использование такого метода пайки особенно полезно для термочувствительных компонентов и конструкций, потому что глубина проникновения тепла мала. Одним из промышленных методов получения СВС фольги является метод магнетронного распыления материалов в вакууме. Распыление производится на вращающиеся подложки из двух магнетронных источников. Скорость осаждения материалов из каждого источника подбирается таким образом, чтобы на подложке образовывались чередующиеся слои нанопленок. Как правило, общая толщина фольги должна составлять 40–60 мкм, в некоторых случаях и до 100 мкм. Использование магнетронного распыления позволяет изготавливать воспроизводимые по физическим свойствам слои нанопленок с различной толщиной бислоев (от единиц до сотен нм).

Одной из самых больших трудностей при изготовлении СВС фольги являются трудности снятия ее с подложки для получения так называемых самоподдерживающихся нанопленок. Другое название таких пленок – свободные пленки. В литературе описано множество

способов получения самоподдерживающихся пленок, однако практически не приводятся технологические аспекты получения пленок – фольг больших размеров (не менее 100x100 мм) с достаточной механической прочностью (без трещин, эластичных), позволяющих проводить с ними дальнейшие манипуляции – осаждение припоя, резка на модули и т. п.

Цель работы – проанализировать имеющиеся способы получения самоподдерживающихся пленок, в том числе пленок с эффектом СВС, провести экспериментальные работы по получению самоподдерживающихся нанопленок и наметить пути дальнейших исследований.

Анализ литературы

Проанализировано 47 литературных источников, где описаны данные по изготовлению фольги. Выбрано 19 источников, представляющих интерес. Часть работ посвящена СВС фольге, часть бериллиевой фольге и углеродным пленкам.

Таблица 1

Литературные данные по изготовлению фольги

Фольга	Толщина бислоя, нм	Число слоев	Толщина фольги, мкм	Подложка	Жертвенный слой	Толщина жертвенного слоя	Технология удаления фольги	Технология изготовления фольги	Лит-ра
Al/Ni-7V (1:1)	25-80	2000, 4273	50-160 107-340	Латунь, водоохлаждаемая	59Ag-27,3Cu-12,5In-1,25Ti	1 мкм	удалены	магнетрон	1
Al/Ni-7V (3:2)	10-120		5-30	Монокремний, полированная латунь			Не удалялись	Магнетрон, определялись кривизна	2
Al/Ni-Fe-Cr	40-69		87-274				удалены	магнетрон	4
Al/Pt				Кремний, двуокись кремния, сапфир. Тподл – 50 гр.С			?	магнетрон	5
Al/Ni-7V мас.% (1:1) – по толщине	25-90	640 2000	16-58 50-180	Латунь водоохлаждаемая			удалены	магнетрон	6
Zr/Si	7,4-29,4		0.3-10	Стекло боросиликатное 26x76 мм			?	магнетрон	7
Al/Ni (3:2)	12,5, 25,50, 100,200		11	Кремний, не более 50 гр.С			Раскалывали кремний и аккуратно удаляли фольгу	магнетрон Слой Al-внизу и сверху фольги	8

Продолжение табл. 1

Фольга	Толщина бислоя, нм	Число слоев	Толщина фольги, мкм	Подложка	Жертвенный слой	Толщина жертвенного слоя	Технология удаления фольги	Технология изготовления фольги	Лит-ра
Al/Ni- (3:2)- тол- щины - для по- луч. атом- ного отн. 1:1	35-85	2000	70-170	Охлаждае- мые под- ложки			удалены	магнетрон	9
Al/Ni- 7V (3:2)- тол- щины - для по- луч. атом- ного отн. 1: 1	25-90 25-90	640 2000	16-58 50-180	Латунь, во- доохлаждае- мая	59Ag- 27,3Cu- 12,5In- 1,25Ti		Припой с двух сто- рон	магнетрон	10
Al/Ni	100- 500	8-30	5 - всегда	Стекло (13х26 мм – вырезаны из большого размера)			Если пер- вый слой никель- легко сни- малось с подложки	ЭЛИ, 3 кВт, 0.5 нм/с	11
Ni/Si	14-56		0.73	Стекло предметное. Комнатная Т	Фоторе- зист Shipley 1425		ацетон	ЭЛИ	12
Al/Ni	60- 300			Стекло	фоторе- зист		ацетон	ЭЛИ	13
Rh/Si				Кремний окислен- ный. Не бо- лее 30 гр.С (на медной водо- охл.пла- стине)			?	ЭЛИ	14
Al/Ti, Si/Ti, Ni/Al	50	До 200		С охлажде- нием	КВр- распы- ляли	0,1 мкм	Легко сняты	магнетрон	15
Al/Ti	5-70	150- 4000		Не более 50 гр.С. Нерж.сталь, стекло, кремний			?	магнетрон	16

Окончание табл. 1

Фольга	Толщина бислоя, нм	Число слоев	Толщина фольги, мкм	Подложка	Жертвенный слой	Толщина жертвенного слоя	Технология удаления фольги	Технология изготовления фольги	Лит-ра
ме- таллы				Стекло 24х24 мм	NaCl (Та испари- тель)	30-40 мкг/см ²	Под углом 30° в воду	нанесение	17
Be			3-20	Молибден, тантал	KCl	0,1-0,2	вода	нанесение	18
Be			0,5	Медь поли- рованная-18 мкм	медь		Травление в 50 % HNO ₃	магнетрон	19
Be				полирован- ная	NaCl		вода	нанесение	20
Ме- талл, кера- мика					Поливи- ниловый спирт		вода	нанесение	21
Al			30-40 нм	стекло	ПАВ		вода	нанесение	22
Be			30	Сталь поли- рованная	NaCl		вода	нанесение	23
Be			25-80	Медь, маг- ний, кварц	Медь, магний		Травление в HNO ₃ . Кварц – нагрев и отслоение (разность КЛТР)		24
Al/Cu O	25- 1000		1-3	Кремний (283К)	фоторе- зист		ацетон	магнетрон	25
Al/Ni 3:2, 1:1					фоторе- зист		ацетон	магнетрон	26
Al/Cu O					фоторе- зист		ацетон	магнетрон	27
Al/Ni (V- 9%) 3:2, 2:3, 1:1		5-6	0,125	Кристалл NaCl			вода	Магнетрон (никель внизу и сверху- чтобы не было окисле- ния алюми- ния	28
C				Стекло 79х89 мм	Соли серно- кислого натрия и ка- лия+сти р.поро- шок+спи рт	Проти- рают марлей с рас- твором	Вода		29

Здесь ЭЛИ – электронно-лучевое испарение, ПАВ – поверхностно-активное вещество.

Как следует из табл. 1, нет полноты сведений по технологии получения самоподдерживающейся фольги. Практически нет данных по габаритам получаемой фольги. Большинство работ посвящено исследованию физических параметров получаемой фольги (температура горения, состав фольги и т. п.). Проведем анализ данных табл. 1 по вариантам получения фольги. Можно выделить три способа получения фольги:

1. Использование жертвенного слоя, т.е. слоя материала, нанесенного на подложку, который после осаждения СВС фольги удаляется в том или ином растворителе. В качестве жертвенного слоя используются пленки солей KBr , $NaCl$, KCl , CaF_2 , поливинилового спирта, фоторезиста, пленки ПАВ.

2. Использование подложки в качестве жертвенного слоя. То есть после осаждения фольги подложка растворяется в том или ином растворителе, тем самым пленка отделяется от подложки. Используются подложки из кремния (для материалов не травящихся в травителе для кремния), подложки из кристаллов соли $NaCl$, подложки из фольги меди.

3. Иные способы, например, осаждение на металлическую подложку (латунь) слоя припоя и далее СВС фольги, после чего она отделялась от подложки (по-видимому, путем нагрева?). Используется изгиб подложки после осаждения СВС фольги. Также используются подложки с большой разницей КЛТР с фольгой. При осаждении на холодную подложку СВС пленки нагревались, в результате чего возникали термические напряжения, при этом фольга отделялась от подложки.

Проанализируем данные по получаемым материалам фольги.

СВС фольга: подложки – латунь (4 работы), стекло (4 работы), кремний (4 работы), сталь (3 работы). Температура подложки в основном не более $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (комнатная). Жертвенный слой – фоторезист (2 работы – толщина не указана, растворитель ацетон), KBr (две работы, толщина $0,1\text{ мкм}$, метод получения – распыление), CaF_2 (одна работа, $1\text{--}2\text{ мкм}$). Большинство (подавляющее) работ – магнетронное распыление.

Бериллиевая фольга и свободные пленки углерода: подложки – медь, стекло, молибден, тантал. Жертвенный слой $NaCl$ и KCl ($0,1\text{--}0,15\text{ мкм}$).

Технология получения жертвенного слоя из солей – испарение или магнетронное распыление. Интересная работа [29], где в качестве жертвенного слоя использовали водорастворимую пленку сернокислого натрия и калия с добавлением стирального порошка и спирта. Полученной жидкой смесью натирали подложку из стекла, после чего на нее осаждали пленку углерода. Далее в воде пленка углерода отделялась от подложки.

Исходя из анализа литературы были предприняты попытки получения $Ni-Al$ фольги на различных подложках. Использовались следующие подложки с размерами $100\times 100\text{ мм}$ и $100\times 120\text{ мм}$:

- пластины из нержавеющей стали полированные;
- стекло марки М1;
- пластина медная полированная;
- пластина латунная полированная;
- полиимид, фольгированный медью (35 мкм) с двух сторон;
- подложки ситалловые СТ50-1 – $60\times 48\text{ мм}$ полированные.

Многослойные пленки (фольга) $Ni-Al$ осаждались магнетронным распылением на вакуумной установке SEMITEG. Режимы осаждения никеля и алюминия подбирались таким образом, чтобы получались пленки $Ni-Al$ с соотношением толщин $1:1$ с толщиной бислоя 100 нм и общей толщиной до 50 мкм . При этом мощность, подаваемая на магнетронные источники, выбиралась таким образом, чтобы температура подложки не превышала $170\text{ }^{\circ}\text{C}$. При более высоких температурах могут происходить нежелательные реакции между слоями, ухудшающие параметры фольги. В качестве жертвенного слоя использовались пленки хлористого натрия, получаемые методом ВЧ магнетронного распыления. Оптимальная толщина пленок $NaCl$ составляла $0,1\text{--}0,15\text{ мкм}$. Типичные результаты по изготовлению $Ni-Al$ фольги приведены в табл. 2.

Параметры фольги Ni-Al

Подложка	Жертвенный слой	Удаление фольги	Параметры фольги			
			d, мкм	СВС	Получаемые размеры	Поверхность
Пластина нерж.стали полированная	NaCl 0.1 мкм. 0.2 мкм, 0.3 мкм	вода	До 18	есть	Кусочки, отшелушивается, трескается	шероховатая
Ситалл	V- NaCl, NaCl	вода	35	есть	До 30x48 мм	Гладкая Эластичная блестящая
Стекло М1	V- NaCl, NaCl Cu-NaCl	вода	20-40	есть	До 80 %	Гладкая Эластичная блестящая
Полиимид фольгированный	NaCl (0.2 мкм)	вода	43	есть	До 90–100 %	Матовая Ровная Немного хрупкая Без изгиба
Пластина латунная полированная	NaCl (0.2 мкм)	вода	43	есть	До 100 %	Гладкая Эластичная Блестящая Небольшой изгиб наружу
Пластина медная полированная	NaCl (0.1 мкм)	вода	30	есть	До 100 %	Гладкая Блестящая Хрупкая Недостаточная полировка

Иногда в процессе осаждения пленок Ni-Al происходила самопроизвольная СВС реакция на подложке (рис. 1). Одной из причин реакции – образование микродуг на поверхности распыляемой мишени (из-за падения отслоившихся пленок с оснастки), что провоцировало процесс СВС.

Рис. 1. СВС процесс на подложке из медной фольги в процессе осаждения пленок Ni-Al (размер подложки 170x150 мм)

Наилучшие результаты были получены на подложках из фольгированного полиимида и латунных полированных пластинах. Фольга получалась гладкой, эластичной, блестящей с минимальным изгибом. Размеры получаемых образцов фольги доходили до 80–100 % от площади подложки. На рис. 2 показана пленка Ni-Al на фольгированном полиимиде (пленка не отделена от подложки). Пленка получается гладкой, без изгибов, что связано с близкими КЛТР пленки и подложки.

Рис. 2. Пленка Ni-Al на фольгированном полиимиде (размер пленки 100x70 мм)

На медных пластинах и пластинах из нержавеющей стали фольга была худшего качества – менее гладкая (зачастую матовая), хрупкая. Это связано с недостаточной полировкой пластин. Шероховатость поверхности стали и меди оценивалась на уровне 0,5 мкм, в то время как шероховатость поверхности стекла и латуни (а также ситалла) не превышала 0,1 мкм. Причем оказалось, что гладкие и блестящие фольги требуют для начала СВС реакции напряжения от 1 В.

На рис. 3 показан фрагмент фольги Ni-Al толщиной 45 мкм, полученной на стекле марки М1.

Рис. 3. Фрагмент фольги Ni-Al (толщина 45 мкм, размер 120x100 мм)

Из рис. 3 видно, что фольга после отделения от подложки изгибается в сторону от подложки. Это связано с тем, что КЛТР фольги больше, чем КЛТР стекла марки М1, в результате чего возникают при осаждении пленок термические напряжения, которые и приводят к изгибу фольги.

Особенность изготовления самоподдерживающихся (свободных) нанопленок и фольги на их основе при использовании жертвенного слоя состоит в следующем:

- адгезия пленок Ni-Al должна быть такой, чтобы в процессе осаждения этих пленок не происходило их отделение от подложки (т.е. термические напряжения, возникающие в системе пленка-подложка не превышали силы адгезии этих пленок к подложке);
- температурные коэффициенты линейного расширения пленок и подложек должны быть близки, при этом получаются минимальные термические напряжения;
- для снижения температуры в процессе осаждения нанопленок необходимо подложки охлаждать.

Проведем ориентировочный расчет термических напряжений СВС фольги Ni-Al, напыленной на разные типы подложек. Термические напряжения зависят от разности коэффициентов термического расширения фольги и подложки. Определяются по известной формуле

$$\sigma := \frac{E}{1-\mu}(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T$$

Здесь σ – термические напряжения; E – модуль Юнга; α – температурные коэффициенты линейного расширения фольги и подложки; μ – коэффициент Пуассона; ΔT – перепад температур при напылении пленок.

Обычно для диэлектрических подложек $E = 70000$ МПа, $\mu = 0,2$. Проведем сравнение термических напряжений для разных типов подложек. Для этого вначале оценим температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) фольги Ni-Al. ТКЛР никеля равен $13,2 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$. ТКЛР алюминия – $23 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$. По закону аддитивности ТКЛР фольги равен $18,1 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$. Закон аддитивности: $\text{ТКЛР (фольга)} = 0,5\text{ТКЛР(Ni)} + 0,5\text{ТКЛР(Al)} = 0,5 \cdot 13,2 + 0,5 \cdot 23 = 18,1 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$.

Наши измерения ТКЛР фольги – $18,6 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$.

ТКЛР подложек: ситалл СТ50-1 – $5 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$, стекло – $8 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$, поликор – $9 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т – $16,6 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$, медь – $16,6 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$, латунь – $18,7 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$.

Температура напыления 160°C . Перепад температуры -140°C (после выемки из вакуумной камеры до $+20^\circ\text{C}$).

Термические напряжения составят (ориентировочный оценочный расчет).

1. Подложка ситалл $\sigma = 70000 / 0,8 (18,1 - 5) \cdot 140 \cdot 10^{-6} = 160$ МПа.
2. Подложка поликор (оксид алюминия) $\sigma = 70000 / 0,8 (18,1 - 9) \cdot 140 \cdot 10^{-6} = 111$ МПа.
3. Подложка нержавеющая сталь $\sigma = 70000 / 0,8 (18,1 - 16,6) \cdot 140 \cdot 10^{-6} = 18$ МПа.
4. Подложка медь $\sigma = 70000 / 0,8 (18,1 - 16,6) \cdot 140 \cdot 10^{-6} = 18$ МПа.
5. Подложка латунь $\sigma = 70000 / 0,8 (18,1 - 18,7) \cdot 140 \cdot 10^{-6} = -13$ МПа

В работе [30] показано, что для пленок Cr-Cu значение адгезии к подложкам из оксида алюминия составляет от $39,2$ МПа для неотожжённых подложек и $48,5$ МПа для отожжённых подложек (1350°C).

Видно (см. п. 1-4 выше), что термические напряжения при напылении СВС фольги на ситалловые и керамические подложки выше в 3–4 раза адгезионной прочности, что и приводит фольгу к отслоению (111 и 160 МПа – термические напряжения; $39,2$ и $48,5$ МПа – адгезионная прочность).

Для подложек из нержавеющей стали и меди термические напряжения, наоборот, в 2–3 раза ниже адгезионной прочности (18 МПа – термические напряжения; $39,2$ и $48,5$ МПа – адгезионная прочность). Следовательно, фольга отслаиваться в процессе напыления не будет.

Многочисленная литература рекомендует производить осаждение СВС фольги на холодные подложки (температура не более 50°C), т.е. перепад температур будет не более

30 °С. Тогда термические напряжения СВС фольги на подложках из ситалла и оксида алюминия уменьшатся примерно в 5 раз – до 22–32 МПа, что не превышает адгезионную прочность (39–50 МПа), следовательно, при такой температуре фольга СВС не будет термически напряженной. Термические напряжения при такой температуре на подложках из стали, латуни и меди будут чрезвычайно малы – до 4 МПа, что в 10 раз ниже адгезионной прочности пленок.

Пути дальнейших исследований по получению самоподдерживающихся нанопленок:

- использование в качестве подложек стекол, полированной латуни и фольгированного полиимида с предварительной нанесенной пленкой соли NaCl (использование жертвенного слоя). При этом температура подложки должна быть минимальной – использование водоохлаждаемых подложкодержателей.

- использование технологии растворения подложки. В качестве такой подложки подходит полиимидная пленка, имеющая высокую температуру плавления (более 200 °С). При этом подложка может быть не охлаждаемой, что позволит повысить скорость осаждения нанопленок.

Заключение

Наиболее высокие параметры (сплошность, гладкость, размеры) фольги Ni-Al получаются на подложках из стекла (покрытого медью), латуни и фольгированного полиимида. Эти подложки целесообразно использовать при повышенных температурах в процессе магнетронного осаждения слоев. Предполагается (из анализа литературы), что параметры пленок будут выше при осаждении их на охлаждаемые подложки.

Предложены пути дальнейших исследований по получению самоподдерживающихся нанопленок: использование технологии с жертвенным слоем на подложках из полированной латуни и стекла; использование технологии растворения подложки – полиимидной пленки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reactive nanostructured foil used as a heat source for joining titanium / A. Duckham [et al.] // Department of Materials Science and Engineering, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218 E. Besnoin and O. M. Knio Department of Mechanical Engineering, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218.
2. Controlling the shape of Al/Ni multilayer foils using variations in stress / Robert Knepper, Gregory Fritz, and Timothy P. Weihsa. Department of Materials Science and Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218.
3. A.J. Swiston Jr., T.C. Hufnagel, T.P. Weihs. Joining bulk metallic glass using reactive multilayer foils. Department of Materials Science and Engineering, The Johns Hopkins University, Maryland Hall 102, 3400 N. Charles Street, Baltimore, MD 21218, USA, 2003.
5. J.A. Floro. Propagation of explosive crystallization in thin Rh~Si multilayer films / IBM, T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, New York.
6. J. Wanga. Joining of stainless-steel specimens with nanostructured AlXNi foils, Department of Materials Science and Engineering, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218 E. Besnoin Department of Mechanical Engineering, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218, A. Duckham, S. J. Spey, and M. E. Reiss, Department of Materials Science and Engineering, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218 O. M. Knio, Department of Mechanical Engineering, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218 T. P. Weih, Department of Materials Science and Engineering, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218. 2003.
7. C.E. Wickersham, Jr. and J.E. Poole. Explosive crystallization in zirconium/silicon multilayers // Varian Specialty Metals Division. Grove City. Ohio 43123. 1987.
8. Effect of intermixing on self-propagating exothermic reactions in Al/Ni nanolaminate foils / A.J. Gavens [et al.]. Department of Materials Science and Engineering, The Johns Hopkins University, 3400 North Charles Street, Baltimore, Maryland 21218. 1999

9. Room-temperature soldering with nanostructured foils / J. Wang [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 83 (2003), 3987–3989.
10. Effects of physical properties of components on reactive nanolayer joining / J. Wang [et al.] // *J. Appl. Phys.* 97, 114307 (2005).
11. T.S. Dyer, Z.A. Munir. The synthesis of nickel aluminides by multilayer self-propagating combustion // *Metall. Mat. Trans. B* 26 (1995) 603–610.
12. L.A. Clevenger and C.V. Thompson. Explosive oxidation in nickel/amorphous-silicon multilayer thin films // Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, K. N. Tu IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, New York 10598. 1989.
13. E. Ma and C.V. Thompson. Self-propagating explosive reactions in Al/Ni multilayer thin films. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. L.A. Clevenger and K.N. Tu, IBM T. J. Watson Research Center, Yorktown Heights, New York 10598. 1990.
14. Propagation of explosive crystallization in thin Rh~Si multilayer films / J.A. Floro, IBM T. J. Watson Research Center, Yorktown Heights, New York 10598. 1985.
15. IOP publishing journal of micromechanics and microengineering. 20 (2010) 064018 (8pp). doi:10.1088/0960-1317/20/6/064018. Fabrication and characterization of reactive nanoscale multilayer systems for low-temperature bonding in microsystem technology Bianca Boettge¹, Joerg Braeuer², Maik-Wiemer², Matthias Petzold¹, Joerg Bagdahn³ and Thomas Gessner² ¹ Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials, Walter-Huëlse-Straße 1, 06120 Halle (Saale), Germany ² Fraunhofer Research Institution for Electronic Nano Systems, Technologie-Campus 3, 09126 Chemnitz, Germany ³ Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics, Walter-Huëlse-Straße 1, 06120 Halle (Saale), Germany E-mail: received 30 November 2009, in final form 21 April 2010 Published 1 June 2010 Online at stacks.iop.org/JMM/20/064018.
16. On the mechanism of heterogeneous reaction and phase formation in Ti/Al multilayer nanofilms / J.-C. Gachon [et al.]. University Henri Poincarre, Nancy 1, BP 239, F 54506, Vandoeuvre les Nancy Cedex, France B Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS, Chernogolovka, Russia, C Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia. 2004.
17. Патент РФ №2040589. Способ получения тонких самоподдерживающихся пленок.
18. Патент РФ №2036244. Способ изготовления тонкой бериллиевой фольги.
19. Патент КЗ №24565. Способ изготовления ультратонкой бериллиевой фольги.
20. Патент РФ №2199606. Способ получения бериллиевой фольги.
21. Патент РФ №2034667. Способ получения тонких металлических или керамических пленок.
22. Патент РФ №2329875. Способ получения тонких металлических пленок на подложке.
23. Патент РФ №2188876. Способ получения бериллиевой и бериллийсодержащей фольги.
24. Патент РФ №3895671. Способ изготовления тонких листов бериллия и его сплавов.
25. Multilayered Al/CuO thermite formation by reactive magnetron sputtering: Nano versus micro / M. Petrantoni [et al.] // *J. Appl. Phys.* 2010.
26. E. Ma, C.V. Thompson, L.A. Clevenger, K.N. Tu. Self-propagating explosive reactions in Al/Ni thin films // *Appl. Phys.* 67, 1990, 2894–2898.
27. K. Zhang, C. Rossi, M. Petrantoni, N. Maura. A nano initiator realized by integrating Al/CuO – based nanoenergetic materials with a Au/Pt/Cr microheater // *J. MEMS* 17 (2008) 832–836.
28. Direct characterization of phase transformations and morphologies in moving reaction zones in Al/Ni nanolaminates using dynamic transmission electron microscopy / J.S. Kim [et al.] // *Acta Mater.* 59, 2011, 3571–3580.
29. А. с. СССР на изобретение №269371. Способ получения самоподдерживающихся угольных пленок.
30. Боряняк Л., Непочатов Ю. Исследование повышения адгезии многослойных металлизационных покрытий к диэлектрическим подложкам гибридных интегральных схем // *Технологии в электронной промышленности*. 2007. № 5. С. 67–71.