

УДК 621.791.3

## ПОЛИТЕРМЫ УГЛОВ СМАЧИВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛЕНОК НА КРЕМНИИ РАСПЛАВАМИ ОЛОВО–СТРОНЦИЙ ДО И ПОСЛЕ ФОТОННОГО ОТЖИГА

© 2014 г. Н. В. Далакова<sup>1</sup>, К. М. Елекоева<sup>2</sup>, А. З. Кашежев<sup>3</sup>, А. Р. Манукянц<sup>2</sup>,  
М. Х. Понежев<sup>3</sup>, А. Д. Прохоренко<sup>2</sup>, В. А. Созаев<sup>2,3</sup>

E-mail: sozaevv@kbsu.ru

Методом лежащей капли в атмосфере гелия исследованы политермы углов смачивания пленок алюминия на кремнии расплавами Sn–Sr, перспективными в качестве бессвинцовых припоев при пайке изделий электронной техники. Обнаружено, что фотонный отжиг пленок улучшает их смачивание. При растекании расплава олово–стронций по поверхности алюминиевых пленок на кремнии, предварительно обработанных фотонным отжигом в течение 4 с, обнаружены пороги смачивания при температурах >850 К.

DOI: 10.7868/S0367676514040139

### ВВЕДЕНИЕ

Характер смачиваемости поверхности, а следовательно, и величина краевого угла смачивания ( $\theta$ ) определяются соотношением величин взаимодействия частиц жидкости (молекул, ионов, атомов) с твердым телом и между собой [1–6]. На поверхности реальных тел имеются разнообразные дефекты шероховатости: структурная и химическая неоднородности, выход дислокаций, адсорбционные слои и т.д., влияющие на  $\theta$ .

Жидкость может образовывать различные краевые углы на поверхности твердого тела в зависимости от состояния поверхности и условий деформирования капли. Морфологию поверхности подложки можно изменить с помощью фотонного отжига. В настоящей работе изучено влияние фотонного отжига на углы смачивания поверхности алюминиевых пленок на кремнии расплавами олова с малыми добавками стронция.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Напыление пленок алюминия на кремний ориентации (111) проводили на установке УВН-70 в вакууме  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  Торр. Затем с помощью нагревателя алюминий расплылся и оседал на кремниевой подложке, температуру которой поддержива-

ли постоянной:  $T \sim 393$  К. Толщину металлических пленок контролировали по сопротивлению спутника, и она составляла  $\sim 100$  нм. Для устранения дефектов и улучшения морфологии поверхности пленок применяли фотонный отжиг ультрафиолетовым излучением мощностью 0.4 кВт в течение 1–10 с. С целью исключения влияния процессов окисления на свойства металлических пленок отжиг проводили в атмосфере аргона. При соответствующем подборе мощности и времени облучения фотонный отжиг приводит к улучшению адгезионных свойств в системе тонкая пленка (алюминия) – кремний.

На экспериментальной зависимости поверхностного сопротивления алюминиевой пленки на кремнии от времени отжига ранее был обнаружен минимум: сопротивление снижается в первые несколько секунд, а затем, при дальнейших временах отжига, наблюдается его увеличение. Оптимальная продолжительность фотонного отжига оказалась в интервале 3–4 с.

Морфологию поверхности металлических пленок до и после фотонного отжига изучали при помощи сканирующего зондового микроскопа SOLVER NEXT. Оказалось, что после фотонного отжига в течение 3 с “шероховатость” уменьшается, и пленка становится более однородной по сравнению со случаем до отжига.

Для изучения смачивания пленок алюминия на кремнии расплавами на основе олова был выбран метод лежащей капли.

Сплавы Sn–Sr готовили из навесок олова (чистотой 99.9999 мас. %) и стронция (чистотой 99.5 мас. %) в Харьковском физико-техническом институте низких температур им. Б.И. Веркина по методике [7, 8].

<sup>1</sup> Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины, Харьков, Украина.

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ.

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова, Нальчик.

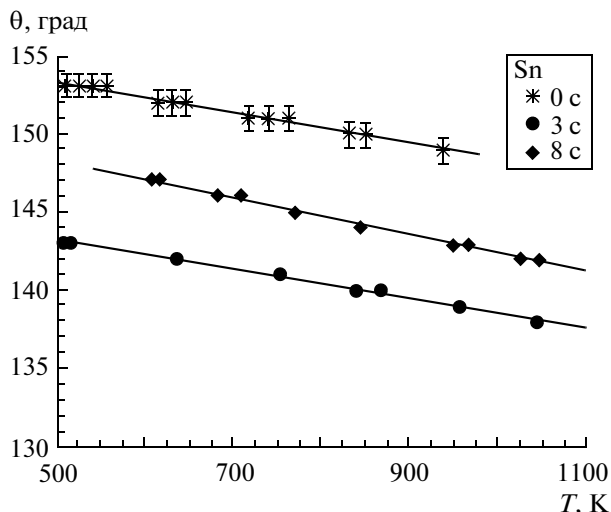


Рис. 1. Политермы угла смачивания пленок алюминия на кремнии чистым оловом в зависимости от продолжительности фотонного отжига.

Образцы сплавов до проведения опытов хранили в силиконовом масле. Подложки размерами  $1 \times 1$  см с каплями исследуемого вещества на них, помещали на предметный столик рабочей камеры, которую откачивали до вакуума 0.01 Па в течение 40 мин до начала измерений. Затем в камеру напускали гелий. Далее проводили собственно эксперимент с фиксацией профиля капли при помощи цифрового фотоаппарата.

Каплю вещества на подложке выдерживали при данной температуре 1 мин. Интервал между последовательными снимками занимал 5 мин.

Обмер фотографий проводили на компьютере в среде COREL DRAW. Ошибка в определении угла смачивания составляла  $\sim 1.5\%$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из рис. 1, на котором приведены результаты экспериментов по исследованию смачивания пленок алюминия на кремнии, видно, что чистое олово не смачивает подложку ни в одном из изученных случаев. С увеличением температуры углы смачивания  $\theta$  уменьшаются. В опытах с неотожженной пленкой алюминия наблюдались самые большие углы смачивания, что, очевидно, связано с большой разупорядоченностью структуры поверхности, большей шероховатостью. Наименьшие углы смачивания были обнаружены на подложках, на которых пленки алюминия подвергали фотонному отжигу в течение 3 с.

Связь краевого угла на шероховатой поверхности  $\theta_{\text{эф}}$  с краевым углом  $\theta$  на гладкой поверхности дает уравнение Венцеля–Дерягина [1]:  $\cos\theta_{\text{эф}} = k\cos\theta$ , где  $k$  – коэффициент шерохова-

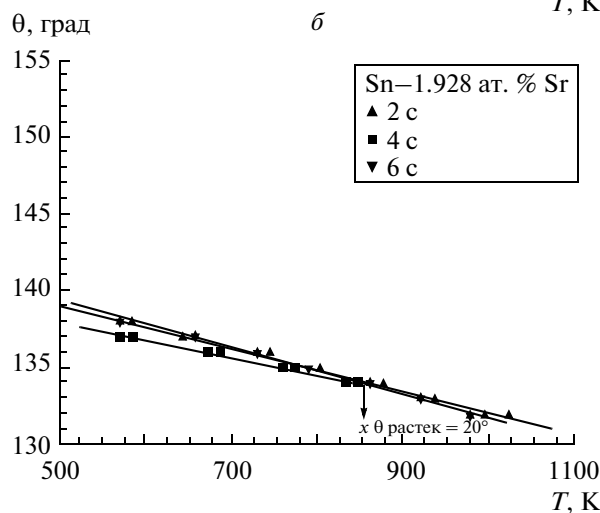
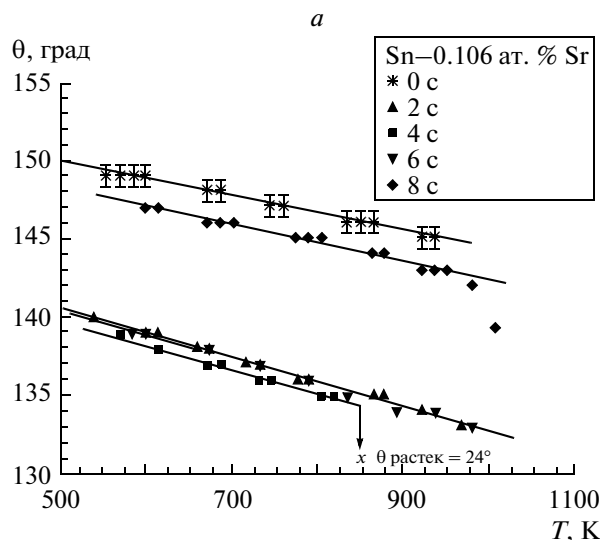


Рис. 2. Политермы углов смачивания пленок алюминия на кремнии расплавами олово–стронций в зависимости от продолжительности фотонного отжига подложек.

тости,  $k = S_1/S_2$ ,  $S_1$  и  $S_2$  – фактическая площадь шероховатой и гладкой поверхностей.

Поскольку  $k > 1$ ,  $|\cos\theta_{\text{эф}}| > |\cos\theta|$ , т.е. шероховатость поверхности улучшает смачивание:  $\theta_{\text{эф}} < \theta$  при  $\theta < \pi/2$ , и ухудшает его при  $\theta > \pi/2$ . В нашем случае  $\theta > \pi/2$ , поэтому уменьшение шероховатости поверхности под действием фотонного отжига должно улучшать смачивание, что и наблюдается в опытах.

На рис. 2 показаны политермы углов смачивания поверхностей подложек расплавами олово–стронций. Незначительное смачивание пленок алюминия на кремнии расплавами Sn–0.106 ат. % Sr и Sn–1.928 ат. % Sr было обнаружено при временах отжига  $\tau = \{0; 2; 6; 8\}$  с и  $\tau = \{2; 6\}$  с соответственно. При продолжительности фотонного отжига пленок алюминия на кремнии в 4 с углы

Коэффициенты  $P$ ,  $Q$  линейных аппроксимаций угла смачивания  $\theta = P - Q \cdot T$  пленок алюминия на кремнии расплавами олово–стронций при различных временах фотонного отжига ( $\tau$ )

Расплав	$\tau$ , с	$P$ , град	$Q$ , град/К
Sn	0	158.1	0.009
	3	147.9	0.009
	8	153.9	0.011
Sn–0.106 ат. % Sr	0	155.6	0.011
	2	148.7	0.016
	4	147.4	0.016
	6	148.3	0.016
	8	153.9	0.012
Sn–1.928 ат. % Sr	2	145.8	0.014
	4	143.9	0.012
	6	147.1	0.015

смачивания наименьшие. Более того, при температурах  $T > 850$  К в случае Sn–0.106 ат. % Sr и  $T > 865$  К в случае Sn–1.928 ат. % Sr происходит резкое падение угла смачивания (до  $24^\circ$  и  $20^\circ$  соответственно, показано стрелочками на рис. 2а и 2б) [9].

Полученные результаты можно объяснить тем, что при времени отжига 4 с на поверхности образцов происходит упорядочение структуры, пленка алюминия становится более гладкой [10]. При высоких температурах на пленках алюминия разрушаются оксиды, что подтверждается резким падением углов смачивания. В случае расплава Sn–0.106 ат. % Sr это происходит при температурах выше 850 К, а в случае расплава Sn–1.928 ат. % Sr – при  $T > 865$  К.

Скорее всего при дальнейшем повышении температуры расплавы системы олово–стронций полностью смочат подложки при временах отжига алюминиевой пленки на кремнии 4 с.

Во всех изученных случаях угол смачивания уменьшается с ростом температуры. Значения коэффициентов линейной аппроксимации углов смачивания приведены в таблице. Тангенс угла наклона всех прямых приблизительно одинаков, что свидетельствует о едином характере взаимодействия между расплавом и подложкой.

## ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований обнаружено, что фотонный отжиг пленок алюминия на кремнии приводит к снижению угла смачивания их чистым оловом и расплавами Sn–Sr. Максимальное уменьшение углов смачивания достигается при временах отжига, соответствующих минимуму поверхностного сопротивления пленок, т.е. 3–4 с. При смачивании пленок алюминия на кремнии расплавами олово–стронций обнаружено резкое падение угла смачивания на пленках, подвергнутых фотонному отжигу в течение 3 с, т.е. при тех временах, при которых достигается минимум поверхностного сопротивления. При смачивании пленки алюминия на грани (111) кремния расплавом Sn–0.106 ат. % Sr резкое снижение углов смачивания наблюдается при  $T \sim 850$  К, а расплавом Sn–1.928 ат. % Sr – при  $T \sim 865$  К.

Работа выполнена с применением оборудования Владикавказского центра коллективного пользования “Наносистемы и материалы для горно-металлургического комплекса”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.
2. Быховский А.И. Растекание. Киев: Наук. Думка, 1989. 220 с.
3. Зимон А.Д. Адгезия и смачивание. М.: Химия, 1974. 413 с.
4. Миссол В. Поверхностная энергия раздела фаз. М.: Металлургия, 1978. 176 с.
5. Иващенко Ю.Н., Евдошук Л.В. // Адгезия расплавов. Киев: Наук. Думка, 1974. С. 79.
6. Лесев В.Н., Созаев В.А. Исследование статической и динамической малых капель. Германия: Lambert Acad. Publ., 2011. 135 с.
7. Александров Б.Н., Далакова Н.В. // ФММ. 1987. Т. 64. № 3. С. 464.
8. Александров Б.Н., Далакова Н.В., Москалец М.В. // Металлы. 1987. № 3. С. 198.
9. Понезжев М.Х., Кашежжев А.З., Манукянц А.Р. и др. Пат. РФ на изобретение №2477206 // БИ. № 7 от 10.03.2013.
10. Понезжев М.Х., Кашежжев А.З., Манукянц А.Р. и др. // Пат. РФ на изобретение №2477204 // БИ. № 7 от 10.03.2013.