

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭЛЕКТРОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ ПЛЕНОК СПЛАВА Al<sub>4</sub>Sm

Л. А. Акашев<sup>1</sup>, Н. А. Попов<sup>1\*</sup>, А. А. Махнев<sup>2</sup>, Е. С. Воронцова<sup>1</sup>, В. Г. Шевченко<sup>1</sup>

УДК 539.216.2

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-1-35-42>

<sup>1</sup> Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН,  
Екатеринбург, Россия; e-mail: n168@mail.ru

<sup>2</sup> Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения РАН,  
Екатеринбург, Россия

(Поступила 16 сентября 2022)

Исследованы оптические свойства и электронные характеристики рентгеноаморфной и поликристаллической пленок сплава Al<sub>4</sub>Sm, полученных методом вакуумного термического испарения. Оптические постоянные измерены эллипсометрическим методом Битти в диапазоне 0.248—7.002 мкм. Из спектральных зависимостей оптических постоянных рассчитаны дисперсионные зависимости световой проводимости  $\sigma$ , отражательной способности  $R$ , мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , функции характеристических потерь энергии электронов  $Im(\epsilon)^{-1}$ . Показано влияние кристаллической структуры сплавов на особенности их оптических спектров. На основе результатов измерений в инфракрасной области спектра по модели двухполосной проводимости рассчитаны электронные характеристики указанных сплавов.

**Ключевые слова:** эллипсометрия, оптические свойства поликристаллических и аморфных сплавов, характеристики электронов проводимости.

The optical properties and electronic characteristics of X-ray amorphous and polycrystalline Al<sub>4</sub>Sm alloy films obtained by vacuum thermal evaporation were studied. The optical constants were measured by the Beattie ellipsometric method in the range of 0.248–7.002 μm. From the spectral dependences of optical constants, the dispersion dependences of the light conductivity  $\sigma$ , reflectivity  $R$ , imaginary and real parts of the dielectric permittivity  $\epsilon_1$  and  $\epsilon_2$  and functions of characteristic energy loss of electrons  $Im(\epsilon)^{-1}$  were calculated. The effect of the crystal structure of the alloys on the features of their optical spectra was shown. Based on the results of measurements in the infrared region of the spectrum, the electronic characteristics of these alloys were calculated using the two-band conductivity model.

**Keywords:** ellipsometry, optical properties of polycrystalline and amorphous alloys, characteristics of conduction electrons.

**Введение.** Аморфные сплавы на основе алюминия активно исследуются в связи с их преимуществами по сравнению с обычными поликристаллическими алюминиевыми сплавами: высокой прочностью на растяжение (>1200 МПа) [1], твердостью в сочетании с пластичностью [2—5], износстойкостью [6], коррозионной стойкостью [7]. В основном в качестве аморфизирующих добавок в алюминий используются лантаноиды и “переходные” металлы (элементы подгрупп III—VIII групп), которые могут оказывать влияние на рост алюминиевых кристаллитов. Из двойных аморфных сплавов наиболее изучена система Al-Sm с широкой областью составов (8—16 ат.% Sm) [8], в которой обра-

## OPTICAL PROPERTIES AND ELECTRONIC CHARACTERISTICS OF POLYCRYSTALLINE AND AMORPHOUS THIN FILMS OF THE Al<sub>4</sub>Sm ALLOY

L. A. Akashev<sup>1</sup>, N. A. Popov<sup>1\*</sup>, A. A. Makhnev<sup>2</sup>, E. S. Vorontsova<sup>1</sup>, V. G. Shevchenko<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; e-mail: n168@mail.ru; <sup>2</sup>M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia)

зуются такие структуры. Сплавы заэвтектического состава исследованы с точки зрения структуры, фазового состава [9—15], термодинамики зародышеобразования при расстекловании [16, 17], а также электропроводности и магнитной восприимчивости [18]. Значительный интерес представляет влияние кристаллической и аморфной структуры на оптические свойства и электронные характеристики сплавов Al-Sm. В данной работе представлены спектральные оптические характеристики тонких пленок сплавов Al<sub>4</sub>Sm в аморфном и поликристаллическом состояниях.

**Эксперимент.** Пленки сплава Al<sub>4</sub>Sm получены на установке ВУП-5М методом вакуумного термического испарения ( $p = 2 \cdot 10^{-4}$  Па) навесок сплава Al<sub>4</sub>Sm с вольфрамового испарителя на подложки из плавленого кварцевого стекла и стеклотекстолитовые контактные площадки с плоскими медными контактами (для измерения удельного электросопротивления), расположенные на одинаковом расстоянии от испарителя (рис. 1). Подложки предварительно обезжиривали ацетон-этаноловой смесью. Подложки из плавленого кварца дополнительно отжигали на воздухе при  $\sim 300$  °C. Для получения рентгеноаморфной структуры пленок напыление сплава проводили на подложках, прижатых вплотную к поверхности охладительного устройства, заполненного жидким азотом. Температура поверхности охладительного устройства контролировалась термопарой и составляла  $-170 \pm 10$  °C. Для получения поликристаллической структуры пленок в процессе напыления подложки поворгались разогреву до температуры  $+175 \pm 10$  °C нагревательным устройством, снабженным галогеновыми лампами и терморезистором для контроля температуры. Толщина получаемых пленок контролировалась массой навески и расстоянием подложек от испарителя.

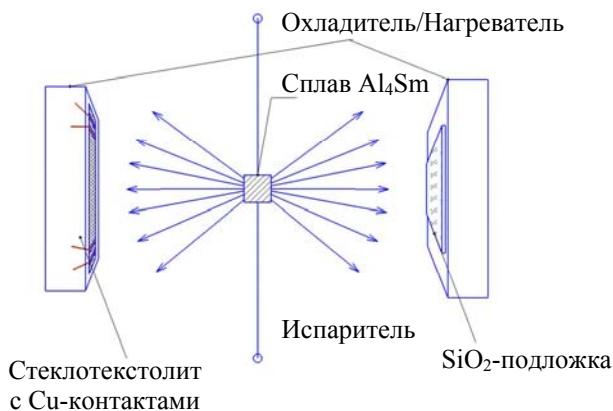


Рис. 1. Схема напыления пленок в вакууме

Измерение удельного электросопротивления пленок и массивных образцов сплавов выполнено четырехзондовым методом с использованием мультиметра Keithley2000 и вольтметра В7-65/5. Исследования методом атомно-силовой микроскопии (ACM) проведены на приборе NTEGRA Prima II (NT-MDT Spectrum Instruments). Оптические характеристики пленок изучены на спектральном эллипсометре SPEL-7LED и эллипсометре, созданном на базе спектрального комплекса КСВУ-12 и гониометра ГС-5.

**Результаты и их обсуждение.** Микроструктура пленок, полученных методом вакуумного испарения, существенно зависит от типа подложки. На микрофотографиях (рис. 2) видно, что пленки сплава Al<sub>4</sub>Sm, напыленные на кварцевое стекло, имеют гладкую поверхность и толщину  $\sim 110 \pm 20$  нм, в то время как на подложке стеклотекстолита — микрошероховатую поверхность и толщину 80—750 нм. Температура подложки практически не влияет на толщину полученных пленок.

Результаты точечной энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) показывают одинаковое элементное содержание Al и Sm (Al-21(±4)at% Sm) во всех точках пленок, что свидетельствует об их однородной структуре. Рентгенодифракционные исследования демонстрируют, что требуемая структура пленок (рентгеноаморфная или поликристаллическая) образуется как на кварцевых, так и на стеклотекстолитовых подложках в зависимости от их температуры в процессе напыления (рис. 3). На дифрактограммах рис. 3, *в*, *г* присутствуют пики от меди, относящиеся к контактам на стеклотекстолите.

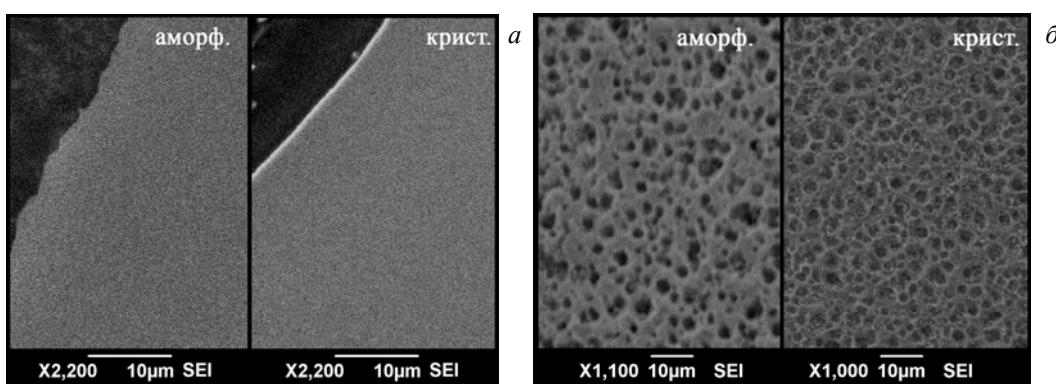


Рис. 2. СЭМ-микрофотографии поверхности пленок Al<sub>4</sub>Sm в рентгеноаморфном и поликристаллическом состояниях на подложках из кварцевого стекла (*а*) и стеклотекстолита (*б*)

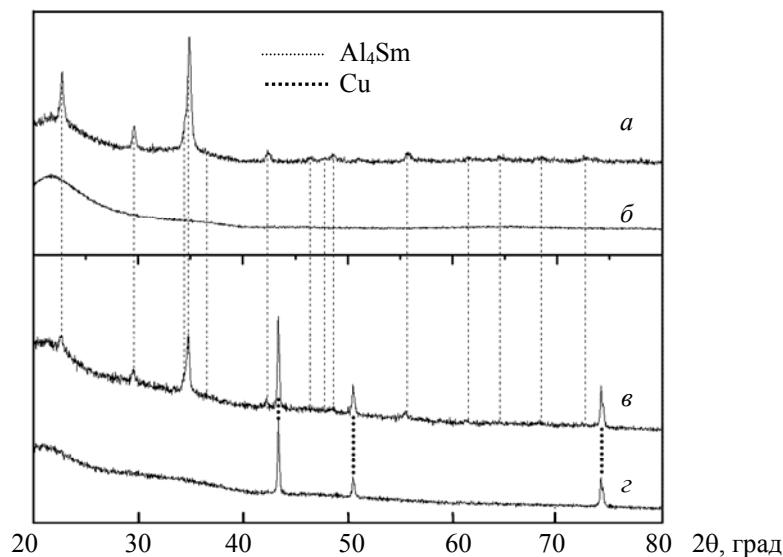


Рис. 3. Дифрактограммы пленок Al<sub>4</sub>Sm на кварцевой (*а, б*) и стеклотекстолитовой (*в, г*) подложках:  
*а, в* — поликристаллическая структура, *б, г* — рентгеноаморфная структура

Исследование рельефа пленок методом ACM показало, что пленки состоят из частиц окружлой формы размером 250—500 нм. С помощью метода фазового контраста (рис. 4) в пленках обнаружено присутствие двух фаз. Зерна второй фазы в аморфной пленке меньше и напоминают первично выпавшие кристаллы, относящиеся к фазе Al<sub>4</sub>Sm [19].

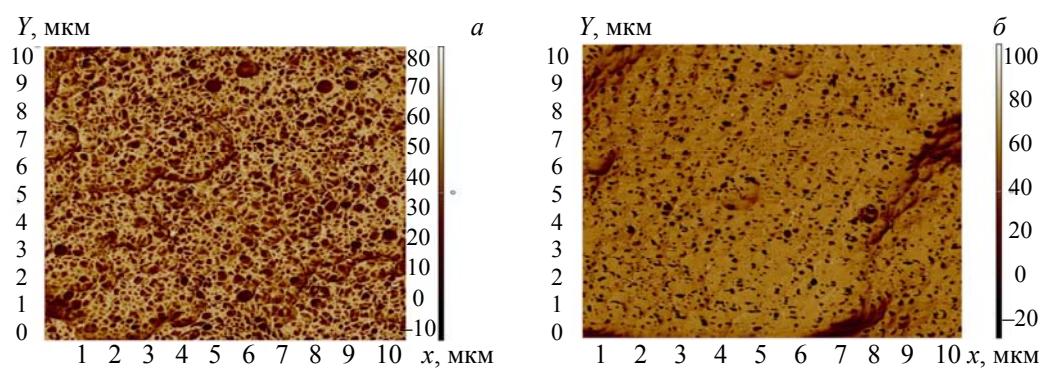


Рис. 4. Фазовый контраст поверхности частиц пленок Al<sub>4</sub>Sm на стеклотекстолитовой подложке, полученный методом ACM: *а* — поликристаллическая структура, *б* — рентгеноаморфная структура

*Спектральные оптические свойства пленок Al<sub>4</sub>Sm.* Измерения оптических спектральных характеристик проведены на пленках, напыленных на кварцевые стекла (рис. 2, а). Такие пленки имеют зеркальную поверхность с хорошей отражательной способностью благодаря гладкой структуре. На рис. 5 приведены спектральные зависимости эллипсометрических параметров  $\Delta$  и  $\psi$ , измеренных на пленках с кварцевой подложкой при угле падения луча на образец 80°. Параметры несколько отличаются от истинных значений сплава, поскольку на его поверхности всегда присутствует тонкий оксидный слой (~50 Å), влияющий на оптические и другие свойства. С помощью приближения Друде—Арчера—Саксены [20, 21] рассчитаны  $\Delta$  и  $\psi$ , которые соответствуют чистой неокисленной поверхности исследуемых пленок. Исходя из полученных значений  $\Delta$  и  $\psi$  для чистой и окисленной поверхностей определены зависимости показателя преломления  $n$  и коэффициента поглощения  $k$  исследуемых пленок от длины волны (табл. 1). Отметим сближение коэффициента поглощения  $k$  для окисленных пленок и “чистой” поверхности с увеличением длины волн.

**Т а б л и ц а 1. Оптические постоянные рентгеноаморфной и поликристаллической пленок Al<sub>4</sub>Sm**

$\lambda$ , мкм	Окисленная		Неокисленная		$\lambda$ , мкм	Окисленная		Неокисленная	
	$n$	$k$	$n$	$k$		$n$	$k$	$n$	$k$
<i>Рентгеноаморфная пленка</i>									
0.248	0.503	2.039	0.81	2.6	1.6	4.498	8.438	5.73	9.2
0.264	0.516	2.152	0.82	2.73	1.7	4.7	8.738	5.94	9.49
0.288	0.606	2.357	0.96	2.97	1.8	4.878	9.027	6.13	9.78
0.302	0.655	2.506	1.05	3.16	1.9	5.041	9.299	6.3	10.05
0.326	0.759	2.736	1.21	3.44	2	5.221	9.587	6.49	10.34
0.344	0.835	2.893	1.33	3.62	2.1	5.342	9.824	6.6	10.58
0.365	0.927	3.028	1.46	3.76	2.2	5.595	10.131	6.89	10.88
0.388	1.004	3.211	1.57	3.97	2.3	5.905	10.422	7.25	11.16
0.4	1.052	3.305	1.65	4.07	2.4	6.117	10.572	7.46	11.28
0.428	1.145	3.526	1.78	4.33	2.5	6.272	10.804	7.62	11.51
0.443	1.214	3.62	1.87	4.42	2.6	6.489	10.977	7.84	11.66
0.477	1.342	3.893	2.06	4.74	2.7	6.702	11.171	8.07	11.84
0.496	1.391	4.047	2.13	4.92	2.9	7.12	11.36	8.48	12.2
0.539	1.577	4.271	2.37	5.13	3.1	7.54	11.883	8.95	12.6
0.564	1.651	4.449	2.47	5.33	3.2	7.776	12.148	9.21	12.8
0.59	1.803	4.612	2.68	5.49	3.6	8.304	13.062	9.76	13.67
0.62	1.896	4.792	2.8	5.68	3.7	8.571	13.409	10.08	14.03
0.653	2.005	4.92	2.92	5.79	3.8	8.632	13.636	10.13	14.27
0.689	2.096	5.064	3.01	5.92	3.901	8.9	13.809	10.3	14.4
0.729	2.193	5.204	3.11	6.04	4	8.957	14.223	10.49	14.6
0.827	2.463	5.715	3.44	6.58	4.201	9.112	14.052	10.61	14.65
0.886	2.652	6.003	3.67	6.87	4.4	9.659	14.759	11.21	15.37
0.954	2.847	6.308	3.9	7.17	4.599	10.034	15.279	11.63	15.9
1	3.045	6.442	4.13	7.27	4.801	10.55	15.544	11.96	16.14
1.1	3.306	6.755	4.41	7.55	5	11.037	15.975	12.71	16.54
1.2	3.567	7.111	4.7	7.9	5.199	11.433	16.6	13.23	17.15
1.3	3.812	7.441	4.97	8.21	5.401	11.841	17	13.68	17.5
1.4	4.036	7.762	5.21	8.53	5.8	12.8	17.787	14.4	18.4
1.5	4.287	8.12	5.5	8.88	5.999	13.224	18.157	15.11	18.8
1.6	4.498	8.438	5.73	9.2	6.2	13.6	18.514	15.4	19.25
1.7	4.7	8.738	5.94	9.49	6.398	14	19.2	15.84	19.7
1.8	4.878	9.027	6.13	9.78	6.599	14.4	19.562	16.28	20.13
1.9	5.041	9.299	6.3	10.05	7.002	15.5	20.7	17.4	21.2
<i>Поликристаллическая пленка</i>									
0.248	0.856	1.884	1.3	2.23	1.8	4.396	6.007	5.1	6.22
0.264	0.844	1.998	1.28	2.38	1.9	4.47	6.191	5.17	6.41

Продолжение табл. 1

$\lambda$ , мкм	Окисленная		Неокисленная		$\lambda$ , мкм	Окисленная		Неокисленная	
	$n$	$k$	$n$	$k$		$n$	$k$	$n$	$k$
0.288	0.907	2.185	1.37	2.6	2	4.553	6.372	5.25	6.6
0.302	0.988	2.283	1.49	2.7	2.1	4.577	6.542	5.25	6.78
0.326	1.099	2.51	1.67	2.97	2.2	4.757	6.813	5.46	7.06
0.344	1.167	2.671	1.78	3.16	2.3	4.888	6.977	5.59	7.22
0.365	1.289	2.834	1.96	3.33	2.4	4.981	7.216	5.69	7.47
0.388	1.42	2.974	2.14	3.46	2.5	5.103	7.353	5.81	7.61
0.4	1.49	3.046	2.23	3.53	2.6	5.106	7.641	5.81	7.8
0.428	1.655	3.209	2.46	3.68	2.7	5.37	7.777	6.1	7.95
0.443	1.748	3.291	2.58	3.75	2.9	5.584	7.996	6.31	8.25
0.477	1.944	3.425	2.82	3.84	3.1	5.859	8.417	6.61	8.68
0.496	2.049	3.506	2.95	3.91	3.2	5.95	8.6	6.87	8.9
0.539	2.291	3.652	3.23	4	3.6	6.5	9.388	7.41	9.66
0.564	2.411	3.729	3.36	4.05	3.7	6.62	9.629	7.43	9.8
0.59	2.522	3.791	3.47	4.09	3.8	6.79	9.857	7.61	10
0.62	2.569	3.812	3.48	4.09	3.901	6.963	10	7.78	10.13
0.653	2.689	3.874	3.59	4.13	4	7.07	10.127	7.9	10.3
0.689	2.787	3.888	3.66	4.11	4.201	7.4	10.349	8.1	10.61
0.729	2.872	3.958	3.72	4.17	4.4	7.6	10.66	8.34	10.94
0.827	3.057	4.086	3.86	4.27	4.599	7.9	10.787	8.68	11.1
0.886	3.162	4.158	3.93	4.33	4.801	8.35	11.152	9	11.49
0.954	3.274	4.3	4.03	4.47	5	8.744	11.598	9.4	11.9
1	3.405	4.398	4.17	4.56	5.199	9	12.288	9.8	12.4
1.1	3.571	4.638	4.33	4.81	5.401	9.364	12.687	10.2	12.75
1.2	3.721	4.839	4.47	5.02	5.8	10.1	13.226	11	13.4
1.3	3.843	5.031	4.58	5.21	5.999	10.477	13.326	11.4	13.6
1.4	3.992	5.229	4.72	5.41	6.2	10.8	13.755	11.73	13.9
1.5	4.117	5.452	4.85	5.64	6.398	11.25	13.928	12.2	14.2
1.6	4.214	5.638	4.93	5.84	6.599	11.6	14.4	12.64	14.6
1.7	4.313	5.818	5.02	6.02	7.002	12.6	15	13.64	15.2

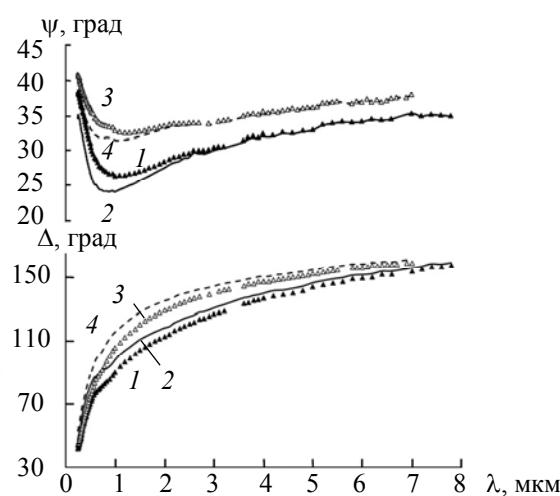


Рис. 5. Спектральные зависимости эллипсометрических параметров  $\Delta$  и  $\psi$ , измеренные на поверхности аморфного и поликристаллического образцов  $\text{Al}_4\text{Sm}$  при угле падения  $80^\circ$ : 1 — поликристаллическая (окисленная), 2 — поликристаллическая (неокисленная), 3 — аморфная (окисленная), 4 — аморфная (неокисленная)

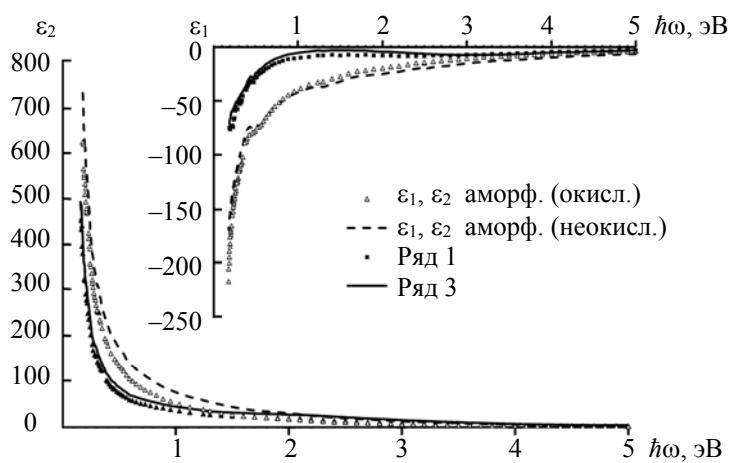


Рис. 6. Спектральные зависимости действительной ( $\epsilon_1$ ) и мнимой ( $\epsilon_2$ ) частей диэлектрической функции поликристаллической и аморфной пленок

Из оптических постоянных (табл. 1) рассчитаны спектры действительной ( $\epsilon_1 = n^2 - k^2$ ) и мнимой ( $\epsilon_2 = 2nk$ ) частей диэлектрической проницаемости указанных пленок (рис. 6).

На рис. 7, *a* и *б* приведены дисперсионные зависимости отражательной способности  $R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$ , а также функции характеристических потерь энергии электронов  $\text{Im}(\epsilon)^{-1} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}$

исследуемых пленок. Видно, что наличие тонкого оксидного слоя на поверхности пленок не оказывает влияния на их отражательную способность. Однако для поликристаллической пленки  $R$  во всем спектральном диапазоне меньше, чем для рентгеноаморфной. Снижение отражательной способности на этой пленке, возможно, обусловлено частичным рассеянием света на первично выделяющихся

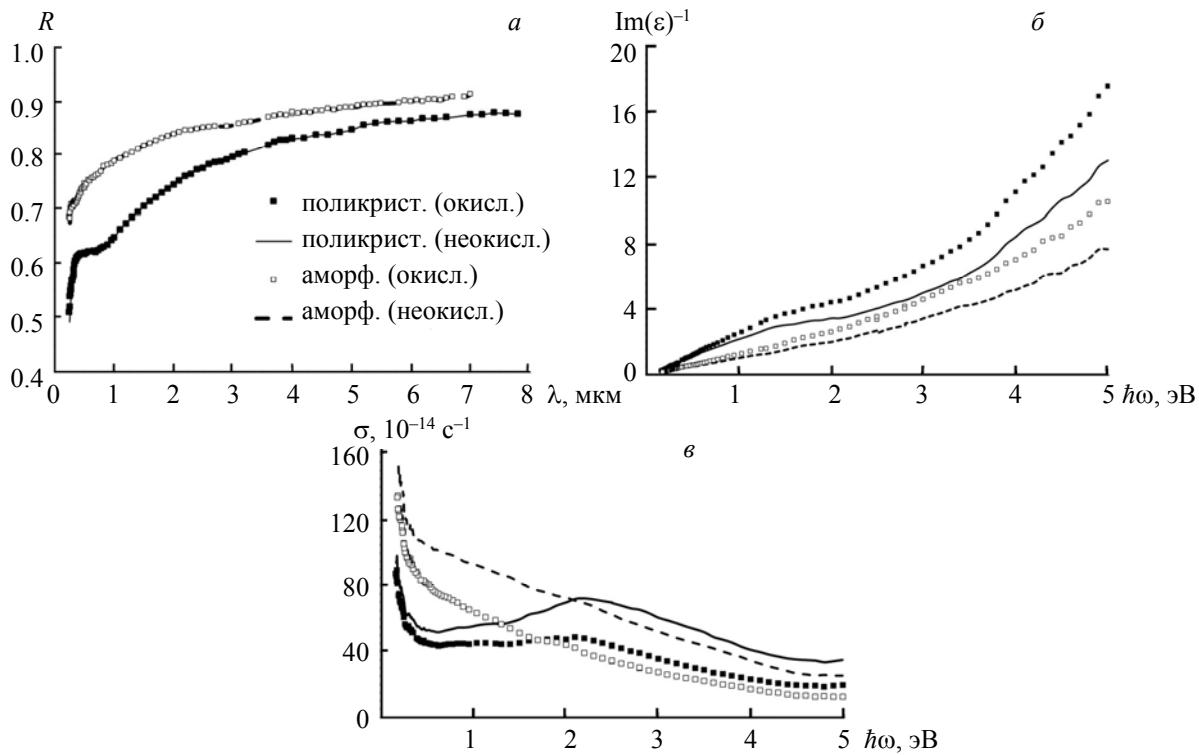


Рис. 7. Дисперсионные зависимости отражательной способности  $R$  (*а*), функции характеристических потерь энергии электронов  $\text{Im}(\epsilon)^{-1}$  (*б*), а также световой проводимости  $\sigma$  (*в*) аморфной и поликристаллической пленок

нанокристаллах (рис. 4, б). На рис. 7, в представлены спектральные зависимости световой проводимости  $\sigma(\omega) = nkc/\lambda$  исследуемых пленок. В спектрах поликристаллической окисленной и неокисленной пленок присутствует широкая полоса поглощения с максимумом при 2.2 эВ, которая обусловлена межзонными переходами электронов и наиболее ярко выражена для неокисленной пленки. Подобная полоса поглощения наблюдается в [22] при сравнении  $\sigma(\omega)$  спектров поликристаллических образцов и аморфных лент Al-8 ат.% Ce, полученных спиннингованием расплава, и спектра жидкого сплава Al-8 ат.% Ce, причем она полностью исчезает в спектре жидкого сплава. В спектре световой проводимости аморфной пленки Al<sub>4</sub>Sm эта полоса также отсутствует и его изменения в зависимости от энергии фотонов носят монотонный характер.

С учетом результатов для ИК-области по модели двухполосной проводимости [23—25] рассчитаны характеристики электронов проводимости (табл. 2 и 3). Согласно этой модели, в проводимости участвуют медленно (*s*) и быстро (*d*) релаксирующие электроны, имеющие разные плазменные ( $\omega_{ps}^2 = 4\pi N_s e^2/m$ ,  $\omega_{pd}^2 = 4\pi N_d e^2/m$ ) и релаксационные ( $\gamma_s$  и  $\gamma_d$ ) частоты,  $\gamma_s \ll \gamma_d$ . Обнаружено, что концентрации *d*- и *s*-электронов проводимости, их плазменные частоты и частоты релаксации для аморфного сплава значительно выше, чем для поликристаллического. Предельная световая проводимость рентгеноаморфного сплава близка к статической проводимости, измеренной четырехзондовым методом. Проводимость поликристаллического сплава, измеренная как оптическим, так и прямым четырехзондовым методом, выше, чем рентгеноаморфного. Это обусловлено нарушением дальнего кристаллического порядка в рентгеноаморфном сплаве.

**Т а б л и ц а 2. Характеристики электронов проводимости поликристаллического и аморфного сплавов Al<sub>4</sub>Sm**

Сплав	$\gamma_s \cdot 10^{-15}$ , с <sup>-1</sup>	$\gamma_d \cdot 10^{-15}$ , с <sup>-1</sup>	$\omega_{ps}^2 \cdot 10^{-30}$ , с <sup>-2</sup>	$\omega_{pd}^2 \cdot 10^{-30}$ , с <sup>-2</sup>	<i>P</i>	$N_s \cdot 10^{-22}$ , см <sup>-3</sup>	$N_d \cdot 10^{-22}$ , см <sup>-3</sup>	$(N_s + N_d) \cdot 10^{-22}$ , см <sup>-3</sup>
Поликристаллический	0.05	1.60	5.4	116.66	20	0.16	3.67	3.83
Аморфный	0.53	3.04	31.17	265.73	-12	0.97	8.34	9.31

П р и м е ч а н и е:  $N_s$ ,  $N_d$  — концентрации *s*- и *d*-электронов,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_d$  — их частоты релаксации,  $\omega_{ps}$ ,  $\omega_{pd}$  — плазменные частоты *s*- и *d*-электронов, *P* — вклад в  $\epsilon_1$  и  $\sigma$  от локализованных электронов.

**Т а б л и ц а 3. Проводимости поликристаллического и аморфного сплавов Al<sub>4</sub>Sm**

Сплав	$\sigma_{os} \cdot 10^{-15}$ , с <sup>-1</sup>	$\sigma_{od} \cdot 10^{-15}$ , с <sup>-1</sup>	$\sigma_o \cdot 10^{-15}$ , с <sup>-1</sup>	$\sigma_{ct} \cdot 10^{-15}$ , с <sup>-1</sup>
Поликристаллический	8.66	5.81	14.47	15.4
Аморфный	4.67	6.96	11.63	11.7

П р и м е ч а н и е:  $\sigma_o$  — предельная световая проводимость,  $\sigma_o = \sigma_{os} + \sigma_{od}$ ;  $\sigma_{os} = \omega_{ps}^2 / 4\pi\gamma_s$ ;  $\sigma_{od} = \omega_{pd}^2 / 4\pi\gamma_d$ ;  $\sigma_{ct}$  — статическая проводимость.

**Заключение.** Методом термического вакуумного испарения получены пленки сплава Al<sub>4</sub>Sm поликристаллической и рентгеноаморфной структур путем изменения температур подложек. Показано влияние типа подложки на микроструктуру пленок. С помощью приближения Друде—Арчера—Саксены рассчитаны спектральные зависимости световой проводимости, отражательной способности, диэлектрической проницаемости и функции характеристических потерь энергии электронов  $\text{Im}(\epsilon)^{-1}$  для неокисленной поверхности исследуемых пленок. Отмечены характерные различия в спектрах световой проводимости  $\sigma$ , обусловленные структурными особенностями этих сплавов и наблюдавшиеся нами ранее на сплавах Al-8 ат.% Ce. В спектрах окисленной и неокисленной поликристаллических пленок обнаружена широкая полоса поглощения с максимумом 2.2 эВ, которая обусловлена межзонными переходами электронов. По модели двухполосной проводимости проведен расчет характеристик электронов проводимости сплавов и предельных световых проводимостей для ИК-области. Проводимость аморфной пленки ниже, чем поликристаллической, что подтверждается результатами измерений четырехзондовым методом.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Института химии твердого тела УрО РАН № АААА-А19-119031890028-0.

- [1] **Y. He, G.M. Dougherty, G. J. Shiflet, S. J. Poon.** Acta Metall. Mater., **41**, N 2 (1993) 337—343, [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(93\)90064-Y](https://doi.org/10.1016/0956-7151(93)90064-Y)
- [2] **V. Jambur, C. Tangpatjaroen, J. Xi, J. Tarnsangpradit, M. Gao, H. Sheng, J. H. Perepezko, I. Szlufarska.** J. Alloys Compd., **854** (2021) 157266, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157266>
- [3] **A. Inoue, T. Masumoto.** J. Alloys Compd., **207-208** (1994) 340—348, [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)90237-2](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)90237-2)
- [4] **C. A. Schuh, T. C. Hufnagel, U. Ramamurty.** Acta Mater., **55** (2007) 4067—4109, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.01.052>
- [5] **J. M. Freitag, R. G. Koknaev, R. SabetSharghi, M. Koknaeva, Z. Altounian.** J. Appl. Phys., **79** (1996) 3967—3970, <http://dx.doi.org/10.1063/1.361824>
- [6] **A. L. Greer, K. L. Rutherford, I. M. Hutchings.** Int. Mater. Rev., **47**, N 2 (2002) 87—112, <https://doi.org/10.1179/095066001225001067>
- [7] **Y. G. Wang, Y. J. Li, S. P. Pan, B. D. Fu, J. Y. Qin, W. M. Wang.** Int. J. Electrochem. Sci., **11** (2016) 3512—3531, doi: 10.20964/110429
- [8] **A. Inoue.** Progr. Mater. Sci., **43** (1998) 365—520, [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(98\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(98)00005-X)
- [9] **F. Meng, Y. Sun, F. Zhang, B. Da, C. Wang, M. J. Kramer, K. Ho, D. Sun.** Phys. Rev. Mater., **5** (2021) 0434021—0434028, doi: 10.1103/PhysRevMaterials.5.043402
- [10] **P. Rizzi, M. Baricco, L. Battezzati, P. Schumacher, A. L. Greer.** Mater. Sci. Forum, **195** (1995) 111—116, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.195.111>
- [11] **Y. E. Kalay, L. S. Chumbley, I. E. Anderson.** J. Non-Crystal. Solids, **354** (2008) 3040—3048, <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.12.006>
- [12] **J. Q. Guo, K. Ohtera, K. Kita, J. Nagahora, N. S. Kazama.** Mater. Lett., **24** (1995) 133—138, [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(95\)00066-6](https://doi.org/10.1016/0167-577X(95)00066-6)
- [13] **F. Q. Meng, S. H. Zhou, R. T. Ott, M. J. Kramer, R. E. Napolitano.** Material, **9** (2020) 100595, <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100595>
- [14] **N. Wang, Y. E. Kalay, R. Trivedi.** Acta Mater., **59** (2011) 6604—6619, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.07.015>
- [15] **Z. Ye, F. Zhang, Y. Sun, M. I. Mendelev, R. T. Ott, E. Park, M. F. Besser, M. J. Kramer, Z. Ding, C.-Z. Wang, K.-M. Ho.** Appl. Phys. Lett., **106** (2015) 1019031(1—4), <https://doi.org/10.1063/1.4914399>
- [16] **S. H. Zhou, F. Q. Meng, M. J. Kramer, R. T. Ott, F. Zhang, Z. Ye, S. Jain, R. E. Napolitano.** Mater. Today Commun., **21** (2019) 100673, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100673>
- [17] **L. Zhao, G. B. Bokas, J. H. Perepezko, I. Szlufarska.** Acta Mater., **142** (2018) 1—7, <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2393-2>
- [18] **M. Pont, T. Puig, K. V. Rao, A. Inoue.** J. Appl. Phys., **71** (1992) 4991, <https://doi.org/10.1063/1.350598>
- [19] **L. Battezzati, M. Baricco.** Mater. Sci. Eng. A, **179/A-180** (1994) 600—604, [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)90275-5](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)90275-5)
- [20] **А. И. Киселев, Л. А. Акашев, Н. А. Попов.** Физикохимия поверхности и защита материалов, **58**, № 2 (2022) 189—198 [A. I. Kiselev, L. A. Akashov, N. A. Popov. Protection of Metals and Phys. Chem. Surfaces, **58**, N 2 (2022) 308—317], <https://doi.org/10.1134/S2070205122020083>, <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=zamet&y=2022&v=58&n=2&a=ZaMet2202008Kiselev>
- [21] **А. В. Ржанов.** Основы эллипсометрии, Новосибирск, Наука (1979) 61—66
- [22] **L. A. Akashov, V. I. Kononenko, V. E. Sidorov, P. Svec, D. Janickovic.** J. Phys.: Conf. Ser., **98**, 062012 (2008) 1—4, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/98/6/062012>
- [23] **Л. А. Акашев, Н. А. Попов, В. Г. Шевченко.** Журн. прикл. спектр., **85**, № 4 (2018) 570—575 [L. A. Akashov, N. A. Popov, V. G. Shevchenko. J. Appl. Spectr., **85**, N 4 (2018) 624—629], <https://zhps.ejournal.by/jour/article/view/282>, <https://doi.org/10.1007/s10812-018-0696-3>
- [24] **Л. А. Акашев, Н. А. Попов, В. Г. Шевченко.** Журн. прикл. спектр., **87**, № 1 (2020) 154—162 [L. A. Akashov, N. A. Popov, V. G. Shevchenko. J. Appl. Spectr., **87** (2020) 134—142], <https://zhps.ejournal.by/jour/article/view/465>, <https://doi.org/10.1007/s10812-020-00974-8>
- [25] **Л. А. Акашев, Н. А. Попов, В. Г. Шевченко.** Опт. и спектр., **129**, вып. 7 (2021) 848—856 [L. A. Akashov, N. A. Popov, V. G. Shevchenko. Opt. and Spectr., **129** (2021) 881—889], <http://dx.doi.org/10.21883/OS.2021.07.51075.1614-21>