

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОГО СПЛАВА МЕДЬ-ГАЛЛИЙ

© В.И.Кононенко, Л.А.Акашев

Сплавы жидкого галлия с тугоплавкими металлами, например медью, используют в технике как диффузионно твердеющие припой для соединения различных материалов, которые позволяют сочетать высокую прочность соединения с герметичностью и низкими температурами термообработки. Ранее были изучены плотность, поверхностное натяжение, вязкость и удельное электросопротивление жидких сплавов галлия с медью [1,2]. Одним из наиболее интересных результатов этих экспериментальных исследований является установление для жидких сплавов с содержанием меди от 50 до 80 ат.% отрицательного температурного коэффициента электросопротивления, который имеет максимум для состава Cu — 30 ат.% Ga.

В настоящей работе представлены результаты исследований оптических свойств жидкого сплава Cu — 30 ат.% Ga в области длин волн 0.48–2 мкм при температуре 1133 К. Оптические постоянные измерены эллипсометрическим методом Битти [3]. Основы метода эллипсометрии изложены в работах [4,5].

Нами разработана установка, позволяющая изучать оптические свойства твердых и жидких металлов и сплавов в интервале температур от комнатной до 1500 К. Установка подробно описана в работе [6]. Исходные металлы содержали сумму контролируемых примесей менее  $5 \cdot 10^{-3}\%$ . Для получения плоской и горизонтальной поверхности металла использовали молибденовые тигли в форме тарелочки диаметром 25–30 мм и высотой 5 мм. Угол между стенкой тигля и его дном составлял  $140^\circ$ , благодаря чему поверхность жидкого сплава оставалась практически горизонтальной, несмотря на сравнительно малые размеры тигля. Анализ погрешности измерений оптических постоянных жидкого сплава медь-галлий показал, что в указанном спектральном диапазоне она не превышала 5%.

В таблице приведены спектральные зависимости оптических постоянных жидкого сплава Cu — 30 ат.% Ga, измеренные при температуре 1133 К. Как видно из таблицы, оптические постоянные этого сплава возрастают по мере увеличения  $\lambda$ : показатель преломления — от 1.21 до 8.12, а коэффициент поглощения — от 3.40 до 9.72. В области 0.62–2.58 эВ

Зависимость оптических постоянных жидкого сплава 70 ат.% Cu — 30 ат.% Ga от длины волны

$\lambda$ , мкм	$n$	$k$	$\lambda$ , мкм	$n$	$k$
0.48	1.21	3.40	0.98	3.85	6.38
0.52	1.31	3.58	1.0	4.01	6.50
0.56	1.43	3.77	1.1	4.40	7.12
0.60	1.70	4.15	1.2	4.73	7.71
0.64	2.02	4.38	1.3	5.09	7.98
0.68	2.45	4.62	1.4	5.55	8.16
0.72	2.62	4.85	1.5	5.98	8.28
0.76	2.80	5.12	1.6	6.43	8.60
0.80	3.23	5.41	1.7	6.86	8.94
0.84	3.30	5.70	1.8	7.47	9.25
0.90	3.65	5.89	1.9	7.80	9.61
0.94	3.78	6.15	2.0	8.12	9.72

по изменным значениям  $n$  и  $k$  для данного жидкого сплава вычислены значения высокочастотной световой проводимости  $\sigma(\omega) = nkc/\lambda$  и отражательной способности  $R$ .

На рис. 1 представлена зависимость световой проводимости от энергии фотонов жидкого сплава Cu-Ga, где отсутствуют какие-либо максимумы, связанные с межполосными переходами электронов. Таким образом, в использованном спектральном диапазоне для указанного жидкого сплава вклад межполосных переходов электронов в оптическое поглощение мал, и характер частотной дисперсии световой проводимости объясняется на основе модели почти свободных электронов. Этот факт подтверждается и на дисперсионной зависимости отражательной способности (рис. 2). Отражательная способность изменяется в этом спектральном диапазоне от 70 до 82% и не имеет каких-либо аномалий.

Используя соотношения, полученные в работе [7], для инфракрасной области спектра были рассчитаны концентрация электронов проводимости  $N$  и частота релаксации  $\gamma$ :

$$N = \frac{0.1115}{\lambda^2} \cdot 10^{22} \cdot (1 + k^2 - n^2) \left[ 1 + \frac{4n^2k^2}{(1 + k^2 - n^2)^2} \right], \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{3.77 \cdot 10^{15}}{\lambda} \frac{nk}{1 + k^2 - n^2}. \quad (2)$$

При  $\lambda = 2$  мкм концентрация электронов проводимости  $N = 2.43 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ , а частота релаксации  $\gamma = 5.04 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$ . Предельное значение световой проводимости

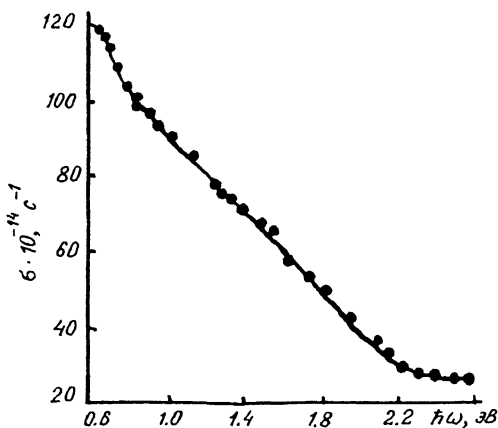


Рис. 1. Зависимость световой проводимости жидкого сплава Cu — 30 ат.% Ga от энергии фотонов.

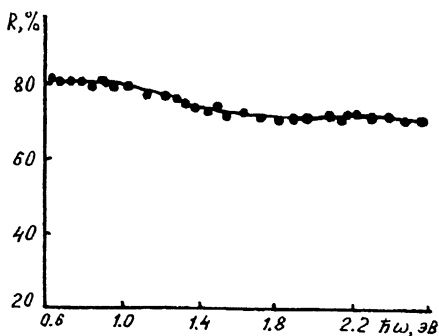


Рис. 2. Дисперсионная зависимость отражательной способности жидкого сплава Cu — 30 ат.% Ga.

$\sigma(0) = Ne^2/m\gamma$  при этом равно  $\sigma(0) = 1.37 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Эта величина предельной световой проводимости хорошо согласуется с удельной статической проводимостью  $\sigma_{ст} = 1.53 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , полученной в работах [1,2] безэлектродным и четырехзондовым методами. Этот факт еще раз подтверждает применимость модели почти свободных

электронов для описания оптических и электрофизических свойств жидкого сплава галлий-медь.

Отрицательный температурный коэффициент электросопротивления  $d\rho/dT$  этого сплава <sup>[1,2]</sup> можно объяснить в рамках модели Фабера-Займана <sup>[8]</sup>, совпадением значения удвоенного волнового числа Ферми  $2k_F$  с положением первого пика структурного фактора  $k_p$ . Для сплавов системы медь-галлий в литературе нет сведений о парциальных структурных факторах  $\alpha_{ij}$ , поэтому строгий анализ в настоящее время невозможен. Качественно же, приняв  $\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{12}$ , объяснение факту  $d\rho/dT < 0$ , данное выше, кажется правдоподобным.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 95-03-08005 а.

### Список литературы

- [1] Кононенко В.И., Сулман А.Л., Яценко С.П. // Изв. АН СССР. Металлы. 1984. № 6. С. 21-24.
- [2] Thörmer K., Coufal H., Fritsch G. // Physical letters. 1976. V. 56. N 6. P. 489-490.
- [3] Beattie J.R. // Phyl. Mag. 1955. V. 46. N 373. P. 235-245.
- [4] Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 583 с.
- [5] Ржанов А.В. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979. 422 с.
- [6] Акашев Л.А., Кононенко В.И., Кочедыков В.А. // Расплавы. 1988. Т. 2. В. 4. С. 53-57.
- [7] Матулевич Г.П. // Тр. ФИАН СССР. 1977. Т. 55. 150 с.
- [8] Островой О.И., Григорян В.А., Вишняков А.Ф. Свойства металлических расплавов. М.: Металлургия, 1988. 304 с.

Поступило в Редакцию  
11 июля 1996 г.