

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРОВОДИМОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛА $\text{CdGa}_2\text{S}_4$ В ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

**С.Н. МУСТАФАЕВА, Д.Т. ГУСЕЙНОВ**

*Институт физики НАН Азербайджана, Баку*

*E-mail: [solmust@gmail.com](mailto:solmust@gmail.com)*

Методом химических транспортных реакций были выращены монокристаллы  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  и изучены их диэлектрические свойства. В монокристаллах  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  изучены частотные зависимости действительной и мнимой составляющих комплексной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и ас-проводимости ( $\sigma_{ac}$ ) в области частот  $f = 5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$  Гц. Установлено, что в диапазоне частот  $f = 5 \times 10^4 - 3 \times 10^6$  Гц в  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  имеют место релаксационные потери, сменяющиеся при  $f \geq 3 \times 10^6$  Гц потерями сквозной проводимости. В области частот  $f = 5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$  Гц ас-проводимость монокристалла  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  подчинялась закономерности  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$ , характерной для прыжкового механизма переноса заряда по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям. Оценены плотность ( $N_F$ ) и энергетический разброс ( $\Delta E$ ) этих состояний  $N_F = 3.3 \times 10^{18}$  эВ<sup>-1</sup>·см<sup>-3</sup>,  $\Delta E = 30$  мэВ, среднее время ( $\tau$ ) и расстояние ( $R$ ) прыжков  $\tau = 5.7 \times 10^{-8}$  с и  $R = 170$  Å.

**Ключевые слова:** монокристалл  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$ , диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, прыжковая проводимость, локализованные состояния

**PACS:** 71.20.Nr, 72.20.Ee, 72.20.Fr, 72.20.Ht

Монокристаллы  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  обладают широким спектром практически важных физических характеристик, таких как высокая фото- и рентгеночувствительность [1, 2]. Эти кристаллы характеризуются высоким электрическим сопротивлением, однако, в литературе отсутствуют сведения об их диэлектрических свойствах. Изучение диэлектрических свойств и электропроводности полупроводниковых кристаллов на постоянном и переменном токе дает информацию о природе процессов переноса заряда, о локализованных состояниях в запрещенной зоне, а также позволяет определить механизм диэлектрических потерь. Для установления механизма переноса заряда весьма существенно знание частотной зависимости этих параметров. В этом плане монокристаллы  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  до настоящего времени не изучены.

Целью работы явилось изучение электрических и диэлектрических свойств монокристаллов  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  в переменных электрических полях, установление механизма переноса заряда, природы диэлектрических потерь и определение параметров локализованных в запрещенной зоне состояний.

Соединение  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  было синтезировано из исходных чистых элементов Cd-0000, Ga (5N) и S “ОСЧ”-15-3 методом двухтемпературного синтеза. По данным рентгенофазового анализа (РФА; дифрактометр ДРОН-3 в  $\text{CuK}_\alpha$  излучение) полученные образцы  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  были однородны и не содержали каких-либо внедрений второй фазы. Параметры кристаллической решетки  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  ( $a = 5.555 \pm 0.002$  Å;  $c = 10.190 \pm 0.005$  Å) совпадали с данными [2].

Монокристаллы  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  были выращены из синтезированного соединения  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  методом химических транспортных реакций (ХТР) в замкнутом объеме с использованием йода в качестве носителя [2].

Образцы из  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  для электрических измерений были изготовлены в виде плоских конденсаторов. В качестве электродов использована серебряная паста. Толщина монокристаллических образцов из  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  составляла 0.11 см.

Диэлектрические коэффициенты монокристаллов  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  измерены резонансным методом [3]. Диапазон частот переменного электрического поля составлял  $5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$  Гц.

На рис. 1а приведены частотные зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) образца  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$ . Как видно из рис. 1а  $\epsilon'$  изученного образца претерпевает значительную дисперсию. По мере увеличения частоты от  $5 \times 10^4$  до  $3.5 \times 10^7$  Гц значение  $\epsilon'$  уменьшается почти в 2.5 раза.

На рис. 1б показана частотная дисперсия мнимой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon''$  монокристалла  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$ .

Величина  $\epsilon''$  с ростом частоты вплоть до  $3.5 \times 10^7$  Гц уменьшается в 3 раза, т.е. дисперсионная кривая  $\epsilon''(f)$  характеризуется довольно ощутимым спадом во всем изученном диапазоне частот.

На рис. 2 представлена кривая частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь в  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$ . Как видно из рис. 2 зависимость  $\text{tg}\delta(f)$  имеет два максимума – один размытый при сравнительно низкой частоте и более четкий при  $f = 1.6 \times 10^6$  Гц. Наличие максимумов на кривой  $\text{tg}\delta(f)$  свидетельствует о том, что в изученном монокристалле  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  имеют место релаксационные потери [4], сменяющиеся потерями на электропроводность при высоких частотах ( $f \geq 3 \times 10^6$  Гц).

На рис. 3 представлены результаты изучения проводимости на переменном токе (ас-проводимости) кристалла  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  при 300 К.

В частотной области  $5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$  Гц ас-проводимость монокристалла  $\text{CdGa}_2\text{S}_4$  изменялась по

закону  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$ . Полученный нами закон  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$  свидетельствует о прыжковом механизме переноса заряда по состояниям, локализованным в окрестности уровня Ферми [5].

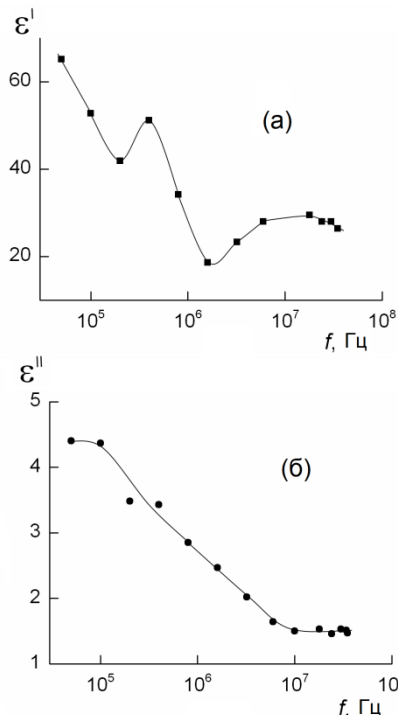


Рис. 1. Частотная дисперсия действительной (а) и мнимой (б) составляющих комплексной диэлектрической проницаемости монокристалла CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>.

В рамках модели Мотта [5] по экспериментально найденным значениям  $\sigma_{ac}(f)$  вычислили плотность состояний на уровне Ферми. Вычисленное значение NF для кристалла CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> составляло  $N_F = 3.3 \times 10^{18}$  эВ<sup>-1</sup>·см<sup>-3</sup>. Вычислено также среднее расстояние прыжков ( $R$ ) в CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>, которое составляло 170 Å. Это значение  $R$  примерно в 5.5 раз превышает среднее расстояние между центрами локализации носителей заряда в монокристалле CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>. Значение  $R$  позволило по формуле

$$\tau^{-1} = v_{ph} \cdot \exp(-2\alpha R) \quad (1)$$

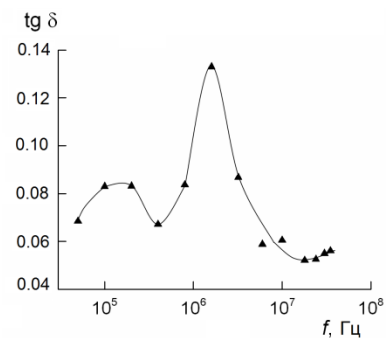


Рис. 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> от частоты переменного электрического поля.

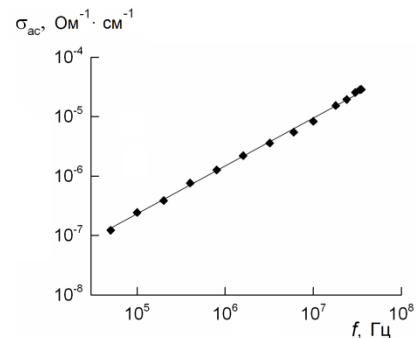


Рис. 3. Частотно-зависимая ас-проводимость (проводимость на переменном токе) монокристалла CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> при  $T = 300$  К.

определить среднее время прыжков в монокристалле CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:  $\tau = 5.7 \times 10^{-8}$  с. По формуле [5]

$$\Delta E = 3/2\pi R^3 \cdot N_F \quad (2)$$

в CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> оценен энергетический разброс локализованных вблизи уровня Ферми состояний:  $\Delta E = 30$  мэВ. А по формуле:

$$N_t = N_F \cdot \Delta E \quad (3)$$

определена концентрация глубоких ловушек в CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>, ответственных за проводимость на переменном токе:  $N_t = 9.9 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

[1] И.В. Боднарь, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь // Неорганические материалы. 2004. Т. 40. № 2. С. 144-148.  
 [2] С.Н. Мустафаева, М.М. Асадов, Д.Т. Гусейнов // Неорганические материалы. 2010. Т. 46. № 6. С. 663-665.  
 [3] С.Н. Мустафаева // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 10. С. 74-79.

[4] В.В.Пасынков, В.С. Сорокин Материалы электронной техники. С.Птб.-Москва-Краснодар. 2004. 368 с.  
 [5] Мотт Н., Э. Дэвис Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир 1974. 472 с.