

## КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И АС-ПРОВОДИМОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ GaSe, ВЫРАЩЕННЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

С. Н. Мустафаева, М. М. Асадов

<sup>1</sup> Институт физики Национальной академии наук, Баку, Азербайджан

<sup>2</sup> Институт химических проблем Национальной академии наук, Баку, Азербайджан

Получена 16 июля 2011 г.

**Аннотация.** В полученных слоистых монокристаллах GaSe изучена частотная дисперсия действительной ( $\epsilon$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) составляющих комплексной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь  $\tan \delta(f)$  и ас-проводимости ( $\sigma_{ac}$ ) в области частот  $f = 5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$  Гц. Установлено, что в изученных кристаллах имеет место релаксационная дисперсия  $\epsilon$  и  $\epsilon''$ . Показано, что диэлектрические потери в GaSe обусловлены релаксационной поляризацией и сквозной проводимостью. В диапазоне частот  $f = 10^5 - 3.5 \times 10^7$  Гц ас-проводимость кристалла GaSe 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 разброс ( $\Delta E$ ) этих состояний  $N_F = 1.3 \times 10^{18} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ ,  $\Delta E = 0.048 \text{ эВ}$ , среднее время ( $\tau$ ) и расстояние ( $R$ ) прыжков  $\tau = 0.1 \text{ пс}$  и  $R = 197 \text{ \AA}$ , а также радиус локализации  $a = 32 \text{ \AA}$ .

**Ключевые слова:** диэлектрические свойства, частота, ас-проводимость, монокристалл GaSe.

**Abstract.** The frequency dispersion of the real ( $\epsilon$ ) and imaginary ( $\epsilon''$ ) components of the complex dielectric constant, dielectric loss tangent  $\tan \delta(f)$  and ac-conductivity ( $\sigma_{ac}$ ) of the obtained layered GaSe single crystals have been studied in the frequency range  $f = 5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$  Hz. It was found that in the studied crystals a relaxation dispersion of  $\epsilon$

and  $\varepsilon''$  takes place. It is shown that the dielectric losses in GaSe are caused by the relaxation polarization and pass-through conduction. In the frequency range  $f = 10^5 - 3.5 \times 10^7$  Hz ac-conductivity of the crystal GaSe varies as  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$ , typical for hopping charge transport mechanism between localized states near the Fermi level. The Fermi-level density of states  $N_F = 1.3 \times 10^{18} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$  and the spread of these states  $\Delta E = 0.048 \text{ eV}$ , the average time  $\tau = 0.1 \text{ } \mu\text{s}$  and distance  $R = 197 \text{ } \text{Å}$  of jumps, as well as the localization radius  $a = 32 \text{ } \text{Å}$  have been estimated.

**Keywords:** dielectric properties, frequency, ac-conductivity, GaSe single crystal.

## ВВЕДЕНИЕ

Монокристаллы GaSe принадлежат к классу слоистых полупроводников, характеризующихся анизотропными физическими свойствами. В [1,2] были изучены процессы переноса заряда в монокристаллах GaSe, выращенных методом Бриджмена. Было показано, что в них при низких температурах ( $T < 200 \text{ K}$ ) на постоянном токе (dc) и при  $T = 300 \text{ K}$  на переменном токе (ac) имеет место прыжковый механизм переноса заряда по состояниям, локализованным вблизи уровня Ферми.

В настоящей работе представлены результаты измерений диэлектрических свойств и ac-проводимости монокристаллов p-GaSe, выращенных из газовой фазы.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Соединение GaSe синтезировано путем сплавления исходных компонентов высокой степени чистоты ( $\geq 99.999\%$ ) в вакуумированной кварцевой ампуле. Монокристаллы GaSe были выращены из синтезированного соединения методом химических транспортных реакций в эвакуированной кварцевой ампуле с использованием йода в качестве носителя. Полученные монокристаллы GaSe представляли собой ярко-красные слои, обладающие высокой оптической прозрачностью.

Образцы из GaSe для электрических измерений были изготовлены в виде плоских конденсаторов. В качестве электродов использована серебряная паста. Толщина кристаллического образца из GaSe составляла 100мкм.

Диэлектрические коэффициенты монокристаллов GaSe измерены резонансным методом с помощью куметра TESLA BM 560. Диапазон частот переменного электрического поля составлял  $5 \times 10^4 - 3.5 \times 10^7$  Гц.

Все диэлектрические измерения проведены при 300 К. Воспроизводимость положения резонанса составляла по емкости  $\pm 0.2$  пФ, а по добротности ( $Q = 1/\text{tg}\delta$ )  $\pm 1.0 - 1.5$  деления шкалы. При этом наибольшие отклонения от средних значений составляли 3 – 4 % для  $\epsilon$  и 7 % для  $\text{tg}\delta$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены частотные зависимости диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) образца GaSe.

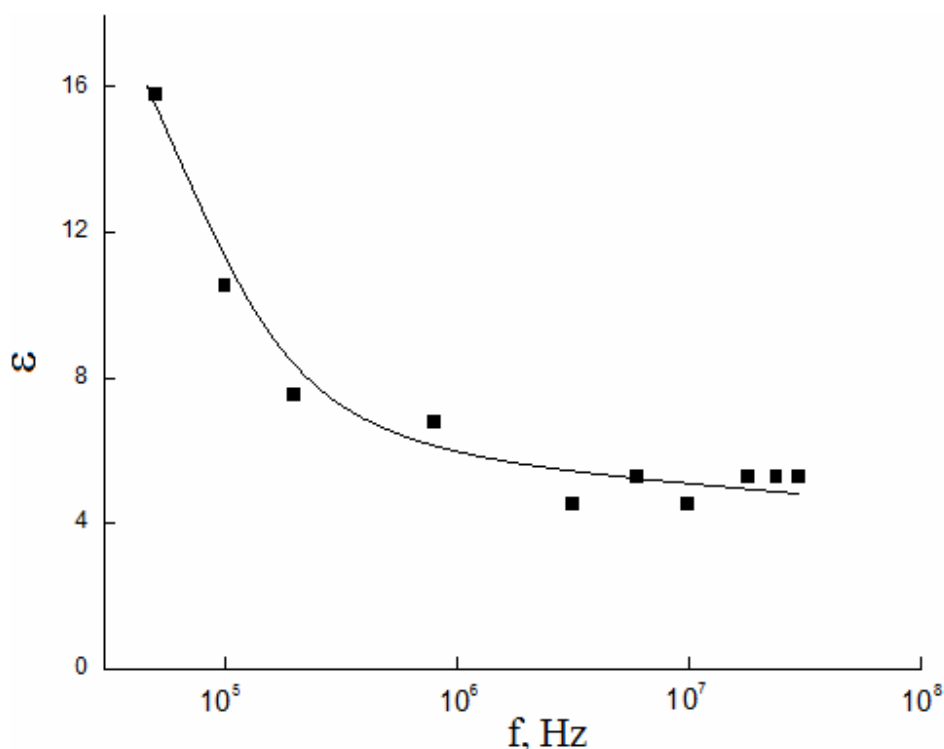


Рис. 1. Частотная дисперсия действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости монокристалла GaSe.

Как видно из рис. 1  $\varepsilon$  изученного образца претерпевает существенную дисперсию. По мере увеличения частоты от  $5 \times 10^4$  до  $3.5 \times 10^7$  Гц значение  $\varepsilon$  уменьшается  $\sim$  в 4 раза. Наблюдаемое в экспериментах монотонное уменьшение диэлектрической проницаемости GaSe свидетельствует о релаксационной дисперсии [3].

На рис. 2 показана частотная дисперсия коэффициента диэлектрических потерь  $\varepsilon'' = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$  в GaSe.

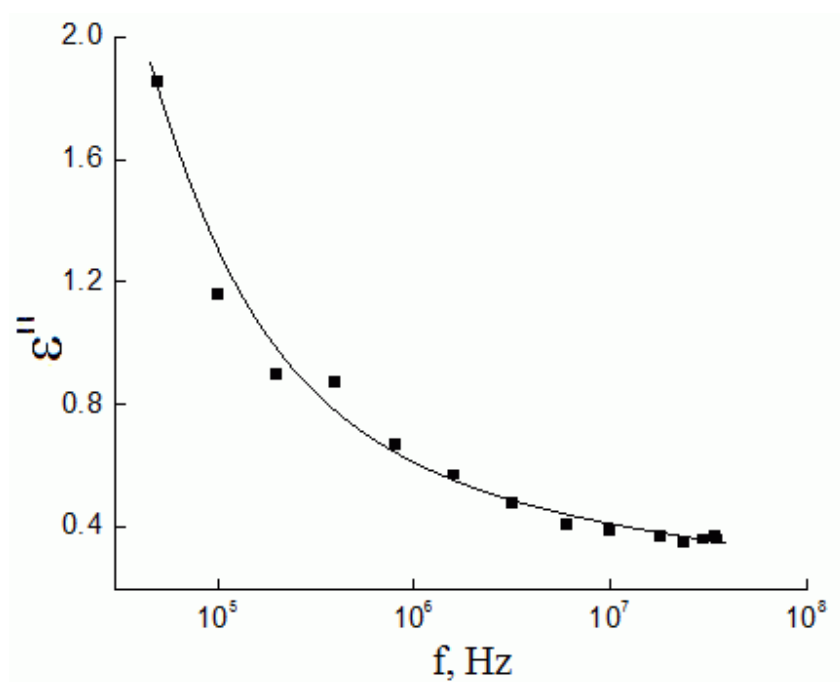


Рис. 2. Частотная зависимость мнимой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости монокристалла GaSe.

Значение  $\varepsilon''$  варьируется в пределах 1.85–0.36 во всей изученной области частот. Величина  $\varepsilon''$  с ростом частоты вплоть до  $3.5 \times 10^7$  Гц уменьшается примерно в 5 раз, т.е. дисперсионная кривая  $\varepsilon''(f)$  характеризуется довольно ощутимым спадом во всем изученном диапазоне частот.

На частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь в кристалле GaSe при  $f = 1.6 \cdot 10^6$  Гц наблюдался максимум (рис. 3), а затем кривая  $\text{tg}\delta(f)$  носила спадающий характер. Форма экспериментальной кривой  $\text{tg}\delta(f)$  в GaSe характерна для частотного изменения диэлектрических потерь с учетом вкладов релаксационного механизма и электропроводности кристалла [3]. Наблюдение максимума на кривой  $\text{tg}\delta(f)$  свидетельствует о релаксационных потерях в GaSe, а наличие одного максимума говорит о том, что монокристалл GaSe имеет одно время релаксации.

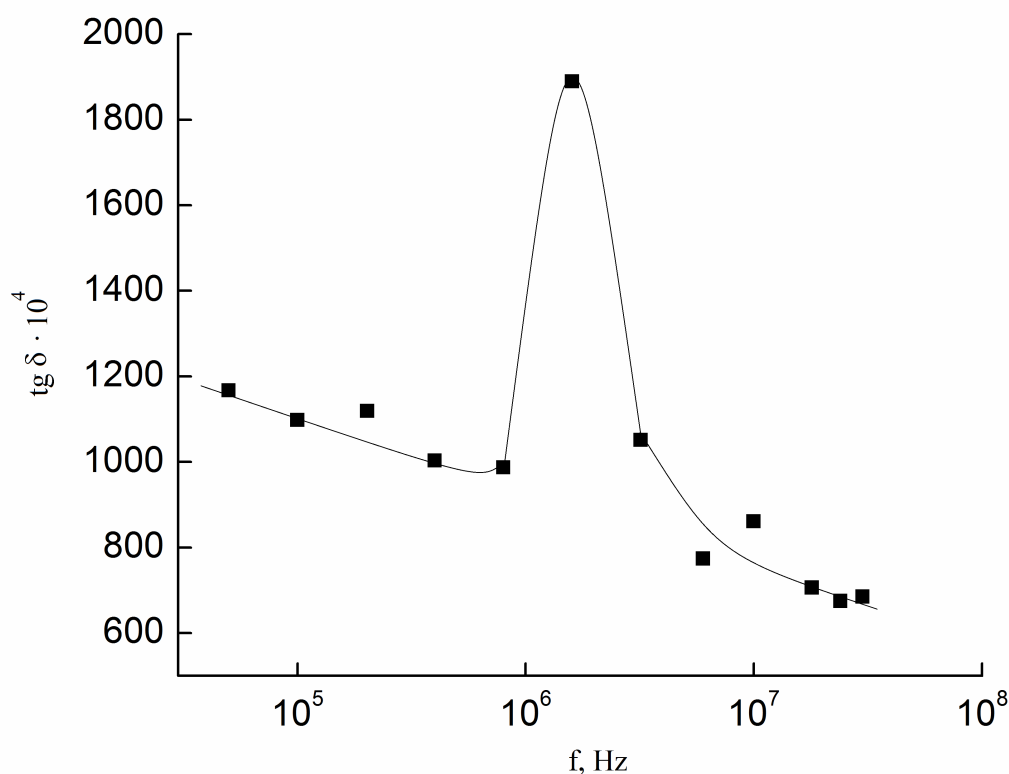


Рис. 3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь в монокристалле GaSe от частоты.

На рис. 4 представлены экспериментальные результаты изучения частотно-зависимой  $\sigma$ -проводимости монокристалла GaSe при 300 К.

В частотной области  $10^5$ – $3.5 \times 10^7$  ас-проводимость монокристалла GaSe изменялась по закону  $\sigma_{ac} \sim f^s$ , где  $s = 0.8$ . Как известно, ас-проводимость зонного типа является в основном частотно-независимой вплоть до  $10^{10}$ – $10^{11}$  Гц. Наблюдаемая нами экспериментальная зависимость  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$  свидетельствует о том, что она обусловлена прыжками носителей заряда между локализованными в запрещенной зоне состояниями.

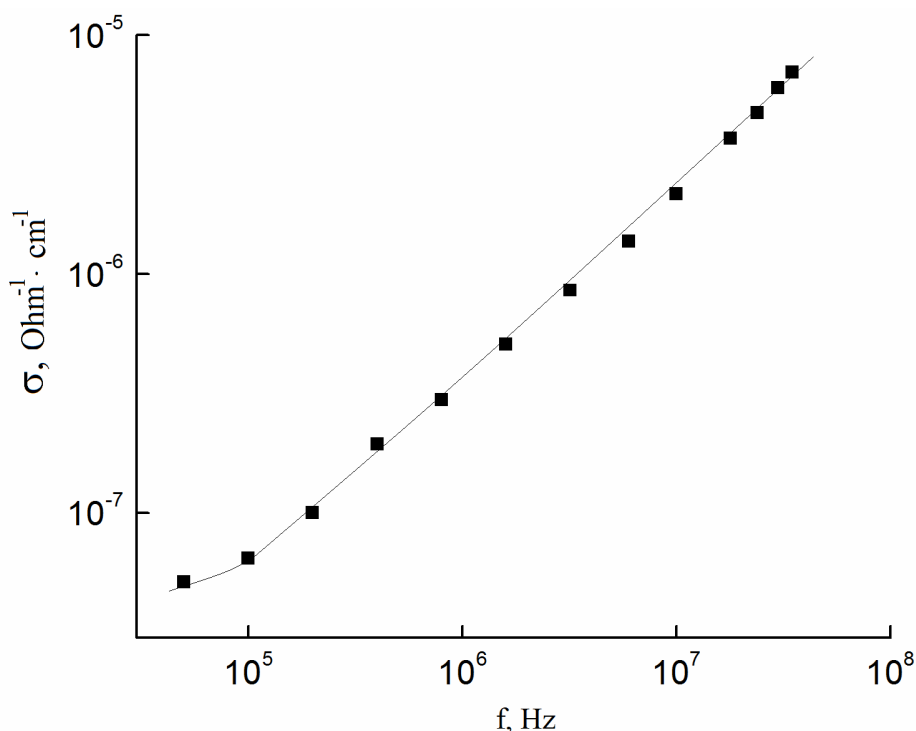


Рис. 4. Частотно-зависимая ас-проводимость монокристалла GaSe при  $T = 300$  К.

Это могут быть локализованные вблизи краев разрешенных зон состояния или локализованные вблизи уровня Ферми состояния [4]. Но так как в экспериментальных условиях проводимость по состояниям вблизи уровня Ферми всегда доминирует над проводимостью по состояниям вблизи краев разрешенных зон, полученный нами закон  $\sigma_{ac} \sim f^{0.8}$  свидетельствует о прыжковом механизме переноса заряда по состояниям, локализованным в окрестности уровня Ферми [5]:

$$\sigma_{ac}(f) = \frac{\pi^3}{96} e^2 k T N_F^2 a^5 f \left[ \ln \left( \frac{\nu_{ph}}{f} \right) \right]^4, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $N_F$  – плотность состояний вблизи уровня Ферми;  $a = 1/\alpha$  – радиус локализации;  $\alpha$  – постоянная спада волновой функции локализованного носителя заряда  $\psi \sim e^{-\alpha r}$ ;  $\nu_{ph}$  – фононная частота.

Согласно формуле (1) ас-проводимость зависит от частоты как  $f [\ln(\nu_{ph} / f)]^4$ , т.е. при  $f \ll \nu_{ph}$  величина  $\sigma_{ac}$  приблизительно пропорциональна  $f^{0.8}$ .

С помощью формулы (1) по экспериментально найденным значениям  $\sigma_{ac}(f)$  вычислили плотность состояний на уровне Ферми. Вычисленное значение  $N_F$  для монокристалла GaSe составляло  $N_F = 1.3 \times 10^{18} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ . При вычислениях  $N_F$  для радиуса локализации взято значение  $a = 34 \text{ \AA}$ , полученное экспериментально для монокристалла GaSe из dc-измерений [2]. Значение  $\nu_{ph}$  взято равным  $10^{12} \text{ Гц}$ .

Согласно теории прыжковой проводимости на переменном токе среднее расстояние прыжков ( $R$ ) определяется по следующей формуле

$$R = \frac{1}{2\alpha} \ln \left( \frac{\nu_{ph}}{f} \right). \quad (2)$$

Вычисленное по формуле (2) значение  $R$  для монокристалла GaSe составляло  $197 \text{ \AA}$ . Это значение  $R$  примерно в 6 раз превышает среднее расстояние между центрами локализации носителей заряда в монокристалле GaSe. Значение  $R$  позволило по формуле

$$\tau^{-1} = \nu_{ph} \cdot \exp(-2\alpha R) \quad (3)$$

определить среднее время прыжков в монокристалле GaSe:  $\tau = 0.1 \text{ мкс}$ .

По формуле [4]

$$\Delta E = 3/2\pi R^3 \cdot N_F \quad (4)$$

в монокристалле GaSe оценен разброс локализованных вблизи уровня Ферми состояний:  $\Delta E = 0.048$  эВ. А по формуле:

$$N_t = N_F \cdot \Delta E \quad (5)$$

определена концентрация глубоких ловушек в монокристалле GaSe, ответственных за ас-проводимость:  $N_t = 6.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

При переносе заряда вследствие прыжковой проводимости по локализованным в запрещенной зоне состояниям следует учитывать, что эти локализованные состояния, случайным образом распределенные в объеме образца, разделены энергетическим барьером. Величина параметра  $s$  в частотной зависимости ас-проводимости позволяет оценить разницу энергий между основным состоянием в энергетическом минимуме и свободным состоянием, в котором носитель может перемещаться по кристаллу [6]

$$W_m = \frac{6kT}{1-s} \quad (6)$$

Расчеты показывают, что в образце GaSe  $W_m = 0.77$  эВ. Полученное значение  $W_m$  и значение диэлектрической проницаемости монокристалла GaSe в области высоких частот, при которых имеет место  $f^{0.8}$ -закон для ас-проводимости, позволяют по формуле

$$a = \frac{e^2}{2\epsilon\epsilon_0 W_m} \quad (7)$$

(где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная) определить боровский радиус локализованного носителя заряда  $a = 32 \text{ \AA}$ . То есть значения радиуса



локализации, полученные из dc и ac-измерений монокристалла GaSe, почти совпадают друг с другом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментальные результаты по изучению частотной дисперсии диэлектрических коэффициентов и проводимости монокристалла GaSe позволили установить природу диэлектрических потерь, механизм переноса заряда, оценить параметры локализованных состояний, такие как плотность состояний вблизи уровня Ферми и их разброс, среднее время и расстояние прыжков, а также концентрацию глубоких ловушек, ответственных за проводимость на переменном токе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мустафаева С.Н., Асадов М.М. Прыжковая проводимость в монокристаллах p - GaSe // Неорганические материалы. 1988. Т. 24 № 6. С. 917–920.
2. Мустафаева С.Н. Прыжковая проводимость в монокристаллах p-GaSe на постоянном токе // Неорганические материалы. 1994. Т. 30. № 5. С. 619–621.
3. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа. 1986. 368 с.
4. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир 1974. 472 с.
5. Pollak M. Frequency dependence of conductivity in amorphous solids // Phil. Mag. 1971. V. 23. P. 519–542.
6. Балашова Е.В., Кричевцов Б.Б., Леманов В.В. Диэлектрическая проницаемость и проводимость пленок триглицинсульфата на подложках Al/SiO<sub>2</sub> и α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // ФТТ. 2010. Т. 52. № 1. С. 119–123.