УДК 539.2+537.226

В.А. КАЛЫТКА, к.ф.-м.н, доктор phD (КарГТУ)
Ж.Б. БАЙДИЛЬДИНА, ст. преподаватель (КарГТУ)
С.Н. КАМАРОВА, магистрант (КарГТУ)
г. Караганда

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ПОЛЯРИЗАЦИИ НАНОПЛЕНОК ДИЭЛЕКТРИКОВ В ОБЛАСТИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

На основании квантово – механического выражения для комплексной диэлектрической проницаемости исследуются аномальные эффекты при поляризации нанометровых слоев (1 – 10 нм) протонных полупроводников и диэлектриков при температурах жидкого гелия (4 – 25 К).

Кристаллы с водородными связями (КВС), по структуре и свойствам кристаллической решетки классифицируют как слоистые кристаллы (кристаллогидраты, слоистые силикаты), а по электрофизическим свойствам (в температурном диапазоне Т = 70 – 450 К; в области слабых полей $E \approx 10^5 \div 10^6 \ \frac{В}{м}$)) как протонные полупроводники и диэлектрики [1].

При низких температурах (70- 100 К) энергетический спектр релаксаторов (протонов) в КВС становится квазидискретным, что требует, при описании миграционной поляризации, применения квантовой статистики Больцмана [2].

Актуально исследование эффектов нанокристаллического состояния (1 – 10 нм) при миграционной поляризации в протонных поупроводниках и диэлектриках, при сверхнизких тбемпературах (4 – 25 К).

Исследование теоретических спектров токов термостимулированной деполяризации (ТСТД) и частотно – температурных спектров тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta(\omega, T)$, в КВС, в диапазоне температур жидкого гелия, должно строиться с помощью аппарата неравновесной матрицы плотности для протонов, двигающихся в поле кристаллического потенциального рельефа, возмущенного поляризующим полем.

Спектры комплексной диэлектрической проницаемости (СКДП) в материалах класса КВС, при низких и сверхнизких температурах, вычисляется методами квантовой кинетической теории протонной релаксации [3].

$$\varepsilon^*(\omega, T) = \varepsilon_\infty + \frac{1}{\varepsilon_0 E_0} \exp(-i\omega t) \int_0^d \Psi^* \hat{P}(x, t) \Psi \, dx , \qquad (1)$$

На основании компьютерной обработки выражения для СКДП нами проведено аналитическое исследование спектров tgδ (T) [1], и вычислены параметры релаксаторов в онотском тальке и гипсе в диапазоне температур 70-350 К, при $\nu_1 = 7 \cdot 10^6$ Гц (таблицы 1,2). По результатам численного расчета, для онотского талька: $T_{max} = 105$ К, $\mathrm{tg}\,\delta(\nu_1, T_{max}) \approx 0{,}5 \cdot 10^{-4}$; $U_0 = 0{,}045$ эВ, а в гипсе: $T_{max} = 97$ К, $\mathrm{tg}\,\delta(\nu_1, T_{max}) \approx 0{,}9 \cdot 10^{-4}$; $U_0 = 0{,}05$ эВ.

Варьированием толщины кристаллического слоя от 30 мкм до 3 нм установлены смещения теоретических температурных максимумов tgδ (T) при $\nu_1 = 7 \cdot 10^6$ Гц, для онотского талька и гипса (таблицы 1,2).

Таблица 1- Температурные положения и амплитудные значения тангенса угла потерь в онотском тальке при различных толщинах кристаллических слоев, при частоте поляризующего поля 7 МГц

Толщина слоя, нм	Амплитуды и температурные положения теоретических максимумов $tg(T)$				
30000	$0{,}5 \cdot 10^{-4}$ (105)	$2{,}5 \cdot 10^{-3}$ (160)	$3{,}2 \cdot 10^{-3}$ (220)	$4{,}25 \cdot 10^{-3}$ (265)	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$ (310)
3000	$1{,}9 \cdot 10^{-4}$ (96)	$2{,}8 \cdot 10^{-3}$ (157)	$3{,}24 \cdot 10^{-3}$ (219)	$4{,}25 \cdot 10^{-3}$ (265)	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$ (310)
300	$2{,}3 \cdot 10^{-4}$ (88)	$5{,}4 \cdot 10^{-3}$ (146)	$4{,}2 \cdot 10^{-3}$ (215)	$4{,}25 \cdot 10^{-3}$ (265)	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$ (310)
30	$4{,}6 \cdot 10^{-2}$ (50)	$6{,}8 \cdot 10^{-3}$ (127)	$7{,}2 \cdot 10^{-3}$ (207)	$4{,}25 \cdot 10^{-3}$ (265)	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$ (310)
3	$0{,}53$ (22)	$5{,}8 \cdot 10^{-2}$ (103)	$5{,}5 \cdot 10^{-2}$ (190)	$5{,}3 \cdot 10^{-3}$ (259)	$4{,}9 \cdot 10^{-3}$ (308)

Согласно таблицам 1,2 низкотемпературный максимум $tg(T)$ наиболее чувствителен к изменению толщины кристаллического слоя, в результате чего: низкотемпературный теоретический максимум в тальке $\mathrm{tg}\,\delta(\nu_1, T_{max})$ с уменьшением толщины слоя от 30 мкм до 3 нм смещается от низких (105 К) в сторону сверхнизких температур (22 К), а амплитуда максимума возрастает от $0{,}5 \cdot 10^{-4}$ до 0,53; в гипсе максимум $\mathrm{tg}\,\delta(\nu_1, T_{max})$ смещается от 97 К к 15 К с возрастанием амплитуды от $0{,}9 \cdot 10^{-4}$ при 30 мкм до $0{,}76$ при 3 нм.

Таблица 2 -Температурные положения и амплитудные значения тангенса угла потерь в гипсе при различных толщинах кристаллических слоев, при частоте поляризующего поля 7 МГц

Толщина слоя, нм	Амплитуды и температурные положения теоретических максимумов $tg(T)$				
30000	$0{,}9\cdot10^{-4}$ (97)	$1{,}8\cdot10^{-3}$ (145)	$3{,}9\cdot10^{-3}$ (210)	$3{,}3\cdot10^{-3}$ (270)	$4{,}1\cdot10^{-3}$ (320)
3000	$1{,}6\cdot10^{-4}$ (89)	$2{,}3\cdot10^{-3}$ (142)	$3{,}24\cdot10^{-3}$ $4{,}3\cdot10^{-3}$ (209)	$3{,}3\cdot10^{-3}$ (270)	$4{,}1\cdot10^{-3}$ (320)
300	$4{,}5\cdot10^{-4}$ (80)	$5{,}4\cdot10^{-3}$ (138)	$4{,}9\cdot10^{-3}$ (200)	$3{,}3\cdot10^{-3}$ (270)	$4{,}1\cdot10^{-3}$ (320)
30	$6{,}6\cdot10^{-2}$ (47)	$7{,}4\cdot10^{-3}$ (130)	$9{,}6\cdot10^{-3}$ (190)	$3{,}5\cdot10^{-3}$ (267)	$4{,}1\cdot10^{-3}$ (320)
3	$0{,}76$ (15)	$3{,}4\cdot10^{-2}$ (102)	$5{,}1\cdot10^{-2}$ (183)	$4{,}9\cdot10^{-3}$ (264)	$4{,}5\cdot10^{-3}$ (317)

Низкотемпературные пики (70 – 100 К) тангенса угла потерь в слоистых минералах характеризуются аномальной зависимостью амплитуды максимума $\mathrm{tg}\,\delta(\nu_1, \mathrm{T_{max}})$ от толщины слоя в диапазоне 1- 10 нм со смещением максимума в сторону гелиевых температур (10 – 20 К).

Список литературы:

1. Тонконогов М.П. Диэлектрическая спектроскопия кристаллов с водородными связями. Протонная релаксация. // УФН. 1998. -№1.-Т. 168.-С.29-54.

2. Тонконогов М.П., Кукетаев Т.А., Фазылов К.К., Калытка В.А. Квантовые эффекты при термодеполяризации в сложных кристаллах с водородными связями. Изв. Вузов. Физика. – 2004. – №6. – С. 8-15.

3. Депонированная научная статья «Квантовые свойства диэлектрических потерь в слоистых кристаллах при низких и сверхнизких температурах». Москва, ВИНИТИ, № 251 В – 2013.08.20.