

Сильные и слабые релаксационные поляризации в диэлектриках



БОГАТИН АЛЕКСАНДР СОЛОМОНОВИЧ

Джеймс Клерк Максвелл ([англ. James Clerk Maxwell](#); [13 июня 1831](#), [Эдинбург](#), [Шотландия](#) — [5 ноября 1879](#), [Кембридж](#), [Англия](#))

2



Maxwell, J.C. *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* / J.C. Maxwell // Oxford, 1864.

1745, Лейден, Кюнеус, ученик Питера ванн Мушенбрека

3



- Запаздывание реакции диэлектрика на изменение электрического поля
- Абсорбционные токи, частотные пики потерь, дисперсия диэлектрической проницаемости
- Систематические исследования релаксационной поляризации – стык 19-20 веков
- Исследовались медленные переходные процессы в диэлектриках на постоянном токе

- Для полного описания релаксационной поляризации в принципе достаточно знать во всем интервале времен или частот одну из трех функций
- $j(t)$ - зависимость от времени плотности абсорбционного тока
 - - исследования при постоянном напряжении
- $\epsilon'(\omega)$ – частотная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости
- $\epsilon''(\omega)$ – частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости
 - - радиочастотные методы

- Установлен принцип суперпозиции токов – Boltzman L., Hopkinson L. *Annal..d. Phys.* 7,624, 1876 г.
- Создана формальная теория релаксационных диэлектрических потерь – E.Schweidler. *Ann. Physik*, 24,711, 1907 г.
- Гетерогенная структура – Wagner K.W. *Ann. Physik*, 40,817, 1913 г.
- Вращение диполей – Pauling L. *Phys/ Rev.*, 36, 430, 1930 г.
- Вращение небольшой части молекул – Дебай, П. Полярные молекулы / П. Дебай // ГНТИ / М-Л, 1931. - 247 с.
- Экспоненциальное затухание процесса , выполнение принципа суперпозиции – Pellat, C *Polarisation et Optique Cristalline. Carré / C. Pellat // Paris,1896.* - 285 p.

- Слабо связанные ионы - ионная тепловая поляризация - Сканава, Г.И. Новый вид диэлектрической поляризации и потерь в поликристаллических диэлектриках / Г.И. Сканава, А.И. Демишина // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1949. - Т.19, № 1. - С. 3-17.
- Электронная тепловая поляризация - Реймеров, Л.И. Электронно-релаксационные процессы в двуокиси титана / Л.И. Реймеров // Журнал технической физики. - 1959. - Т. 29, № 2. - С. 261-266.

Электрические неоднородности

Комплексное выражение для ϵ' , ϵ'' двухслойного конденсатора

8

- Хиппель, А.Р. Диэлектрики и волны / А.Р. Хиппель // Издательство иностранной литературы. М, 1960. - 440 с.
- Матричные системы - Wagner, K.W. Erklarung der dielektrischen Nachwirkungsvorgange auf Grund Maxwell'scher Vorstellungen. / K.W. Wagner // Arch. Elektrotechn., 1914. - В.2 - S. 371-387.
- Оделевский, В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. 1. Матричные двухфазные системы с невытянутыми включениями / В.И. Оделевский // ЖТФ. - 1951. - Т. 21Б, № 6. - С. 667-677.
- Статистические смеси - Оделевский, В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. 2. Статистические смеси невытянутых частиц / В.И. Оделевский // ЖТФ. - 1951. - Т.21Б, № 6. - С. 678-685.
- Bruggeman, D.A. Verschiedener physikalischen Konstanten von heterogenen Substanzen / D.A. Bruggeman G. Berechnung// Ann. Phys. - 1935. - В. 24, № 5. - S. 636-679.

Распределения релаксаторов

9

- Дебай
- Коула-Коула
- Дэвидсон- Коула
- Гавриляка- Негами
- Фрелих
- Диссадо-Хилл
- Хигаси

- Позисторы
- Сегнетоэлектрики-релаксоры
- Пластифицированные нанокompозитные полимеры

ЖИЗНЬ И ГИБЕЛЬ ПРОФЕССОРА КОЛЛИ

- **Андрей Робертович Колли (1874—1918)**
- Человек редкой интеллектуальной мощи, талантливый физик, сделавший открытия мирового уровня, мужественный и убежденный общественный деятель. Обаятельный, деликатный, скромный, искренний, бескорыстный. Таким знали Андрея Робертовича Колли его друзья, ближайшие сотрудники, ученики.
- Он был сыном известного русского физика Роберта Андреевича Колли (предки по отцу — англичане). Мать, Мария Владимировна — выдающаяся пианистка и певица, вокруг которой объединялся кружок московской интеллигенции.
- Детство прошло в Казани. С переходом профессора Р. А. Колли из Казанского университета в Петровскую Академию, семья переехала в Москву, поселилась в Петровском-Разумовском. Среднее образование Андрей Робертович получил в гимназии Креймана, высшее — в Московском университете.

1939 г. УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК Т. XXI, вып. 3
ПАМЯТИ Е. В. БОГОСЛОВСКОГО // В. К. Аркадьев, Москва

12

ПАМЯТИ Е. В. БОГОСЛОВСКОГО

В. К. Аркадьев, Москва

5 января 1939 г. после кратковременной болезни неожиданно скончался профессор Ростовского на Дону университета, доктор физико-математических наук Евгений Васильевич Богословский.

Е. В. Богословский родился 18 марта 1885 г. в Рязани. В 1909 г. он окончил Московский университет, при котором был оставлен для



подготовки к профессорскому званию. Я познакомился с ним, когда он, будучи еще студентом, появился в исследовательской лаборатории проф. П. Н. Лебедева; там Е. В. разработал метод стробоскопического наблюдения капиллярных волн, распространяющихся по поверхности жидкости. Выработанный им прием оказался настолько практичным, что им до сих пор пользуются в Московском университете на лекциях для демонстрации основных явлений отражения, преломления, интерференции и дифракции волн¹.

В 1910 г. Е. В. был приглашен ассистентом при кафедре физики Варшавского университета, которую в то время занимал А. Р. Колли. С этого времени научные интересы Е. В. определяются тематикой Варшавского

Тверцын Всеволод Сергеевич (1892 - ?), профессор.

13

- Окончил в 1917г отделение химии Киевского политехнического института. Работал в Изюмском народном университете, директором цементного завода, заведующим физическим отделом НИИГрознефти, Грозненском нефтяном институте, Ростовском филиале Северо-Кавказского энергетического института. В РГУ работал с 1933 по 1938 год, заведовал кафедрами общей физики (1935-1936 гг.), технической физики (1936-1938 гг.). Докторскую диссертацию "Электролитические конденсаторы" представил к защите в 1937г. Организовал в 1934г на условиях полного хозяйственного расчета Научно-техническое бюро и мастерские при физико-математическом факультете, преобразованные в 1939г в Экспериментальные мастерские при НИФМИ. Среди разнообразной продукции, разработанной им, были электролитические конденсаторы различного назначения, выпускавшиеся мастерскими впервые в СССР.
- Основные направления научной работы - исследования вентильного эффекта на алюминиевой фольге, разработка конструкций конденсаторов, создание специального оборудования для их производства.
- Автор 37 научных работ, основные из которых посвящены нефтехимии и вентильному эффекту.

Новосильцев Николай Сергеевич (1899-1959), доктор физико-математических наук, профессор.

14

- Окончил в 1925г физико-математический факультет Донского университета. Ученик профессора Е.В. Богословского. В РГУ работал с 1928г. Был заведующим кафедрой физики, директором НИФМИ. Защитил в 1937г кандидатскую диссертацию "Разработка методики прецизионных измерений для изучения показателя преломления в области электрического спектра жидкостей", а в 1958г - докторскую диссертацию "Влияние условий кристаллизации на сегнетоэлектрические свойства титаната бария". Ученое звание профессора присвоено в этом же году. Совместно со своим учеником доцентом А.Л. Ходаковым организовал получение сегнетоэлектрических кристаллов и керамики, разработал аппаратуру и методы их исследования, создал ряд лабораторий и сформировал широко известную в нашей стране и за рубежом научную школу физиков-экспериментаторов.
- Основные работы посвящены исследованию взаимодействия электромагнитных волн с жидкими и кристаллическими диэлектриками и изложены в более чем 60 научных работах, среди которых "Диэлектрический гистерезис", "Поверхность свободной энергии и уравнение состояния сегнетоэлектрика" "Специальный практикум по сегнетоэлектрикам" (в соавторстве с А.Л. Ходаковым).

100 лет со дня рождения **Абрама Лазаревича** **ХОДАКОВА** (1912– 1962), физика.

15

- Профессор Ростовского государственного университета Ходаков руководил кафедрой экспериментальной и теоретической физики (1947-1962). Один из создателей научного направления в области физики сегнетоэлектриков. «Специальный практикум по сегнетоэлектрикам» (1957) под редакцией Н. С. Новосильцева и А. Л. Ходакова долгое время был незаменимым источником для научно-исследовательских лабораторий страны.

Фесенко Евгений Григорьевич (р. 1918), доктор физико-математических наук, профессор.

16



Доктор физико-математических наук, профессор, ветеран Великой Отечественной войны, кавалер орденов Отечественной войны первой и второй степеней, Красной Звезды и Трудового Красного Знамени, медалей «За боевые заслуги», лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, заслуженный профессор Ростовского государственного университета, директор НИИ физики РГУ, известный ученый-физик, кристаллофизик, кристаллохимик, материаловед. Евгению Григорьевичу Фесенко было бы сейчас 90 лет. Юбилей отмечался научной общественностью в здании его любимого НИИ физики ЮФУ.

заключенные в них особые свойства, которые ин-креально-формализованы как «костяк» - структура - свойства - применение. Они стали лейтмотивом его научной мысли. Были обнаружены новые семейства соединений. Результаты исследований были отражены в монографии «Семейство перовскита и сегнетоэлектричества». Колоссальный собственный и мировой опыт получения и применения монокристаллов, керамики и тонких пленок был обобщен в монографии «Физика тонких сегнетоэлектрических пленок», «Новые пьезоэлектрические материалы», «Двумерная структура монокристаллов сегнетоэлектрических кристаллов».

В 1975 году за цикл работ

Имя профессора Е.Г.Фесенко открывает двери американских лабораторий

Сотрудники Департамента акустики и вибрации государственного университета штата Пенсильвания (PSU) приглашают в гости на МКТБ «Пыльаэрозоль» Южно-го федерального университета новинные разработки в пылеотловке и экологическом. Ученые ЮФУ познакомилась с выдающимися учеными и изобретателями профессором Е. Кроссом. Приглашают директор-главный конструктор МКТБ «Пыльаэрозоль» профессор А.Е. Панев.

«В университете нас пригласил директор Департамента акустики и вибрации профессор Е. Чен. По программе повышения квалификации нам предстояло услышать чуждые контакты в образовательной и научной деятельности, узнать о новых разработках современных технологий, компьютеризации образовательного процесса.

Этот университет - традиционный учебно-научный международный колледж. У него свой аэропорт. Студенты на Бойльсхем-мачте - первый по величине в мире. Их соревнования по американскому футболу ода символики вся Америка.

Структура PSU состоит из департаментов естественно-научного, гуманитарного и медицинского направлений. Пилотирование штатного Института здоровья человека. Наибольшим достижением является юридический и медицинский факультеты. Не менее популярны факультеты подготовки специалистов в области IT, микроэлектроники, электроники и пылеотловки.

Департамент акустики вибрации является центром американской пьезоэлектрики. Его научный руководитель - профессор Е. Кросс, ученый-авторизованный в области материаловедения и пылеотловочных устройств.

«В вопросах американской колледж познакомиться лично с профессором Е. Кроссом, чтобы познакомиться с ним о мировые тенденции развития пьезоэлектрики. Мне объяснили, что это невозможно из-за его преклонного возраста. Уже пять лет он не встает из-за его артрита колена. Тогда в поросси передать кому-нибудь, что с нами когда бы встретился ученый профессор Е.Г. Фесенко из РГУ. Услышав об этом, профессор немедленно пригласил нас. Принимавший нас профессор Е. Чен был весьма доволен.

Лаборатория профессора Е. Кросса находится на первом этаже Института материаловедения PSU. Неожиданно профессор попросил нас о двух экземплярах, ставя под сомнение последние новинки, утверждая, он не знает, как соединить Е. Чен пылеотловочный останетель, что ему быстрое не придется разрабатывать (суть изобретения).

Е. Кросс показал коллекционный материал, обладающий исключительными свойствами для герметизации: ул-

БОЛЕЕ СЕМИ ЛЕТ нет с нами нашего учителя. Е.Г. Фесенко-физик, но он работоспособен, ответственность в любом деле, строгими принципами, общими знаниями. У него было внутреннее чутье к деталям любого исследования. Как никто он мог помочь разобраться в научном и жизненном проблемах.

Создатель пьезоактивных материалов

Окончил в 1941г физико-математический факультет Ростовского университета, где его учителями были профессор Е.В. Богословский и В.С. Тверцын и доцент Н.С. Новосильцев, и инженерный бронетанковый факультет Военной академии механизации и моторизации РККА в 1942г. В РГУ работает с 1949г, научным сотрудником НИФМИ, доцентом, заведует кафедрами теоретической и экспериментальной физики, физики диэлектриков, кристаллофизики и структурного анализа (1963 - 1988) и директором института физики (1973 - 1989). Кандидатскую диссертацию "Кристаллическая структура цоизита" защитил в 1954г, а докторскую - "Исследование семейства перовскита" - в 1973г. Ученое звание профессора присвоено в 1973г.

Прокопало Олег Иосифович (1922-1991), доктор физико-математических наук, профессор.

17



- Окончил в 1950г Ростовский университет и аспирантуру. Защитил в 1953г кандидатскую диссертацию "Электропроводность и медленные поляризации в керамике BaTiO", а в 1980г - докторскую диссертацию "Электропроводность и медленные поляризации оксидов семейства перовскита". Ученое звание профессора присвоено в 1982г. Заведовал лабораторией НИФТИ, был деканом физического факультета, заместителем директора НИИ Физики по научной работе.
- Основное направление научной работы - исследования механизмов электропроводности и медленных поляризаций в соединениях кислородно-октаэдрического типа. Создал школу исследователей диэлектрических и полупроводниковых свойств сложных оксидов.
- Автор более 300 научных работ, в том числе 3 монографий, среди которых "Титанат бария" (соавторы Е.Г.Фесенко и др.) и более 60 авторских свидетельств.
- Подготовил 4 докторов и 16 кандидатов наук.

История НКТБ "Пьезоприбор"

18

- В 1946–49 гг. заведующий кафедрой экспериментальной и теоретической физики РГУ доцент Н.С.Новосильцев и его ученик доцент А.Л.Ходаков организовали на кафедре и в лаборатории диэлектриков Научно-исследовательского физико-математического института (НИИФМИ) РГУ получение и исследование сегнетоэлектрической керамики и кристаллов.

- С 1950 г. при поддержке академиков А.Ф.Иоффе и В.М.Вула исследования сегнетоэлектриков значительно расширились и приобрели комплексный характер.

- С 1959 г. в СССР началось интенсивное становление пьезотехники, связанное с возрастающими потребностями развивающихся отраслей промышленности. Выпуск серийной продукции начал осуществляться на заводах, имеющих крупные пьезокерамические производства (г. Волгоград, Витебск, Ухта).

- Возглавил молодой и активно развивающийся коллектив ОКБ «Пьезоприбор» (с 1990г. НКТБ «Пьезоприбор») Олег Павлович Крамаров, кандидат физико-математических наук.

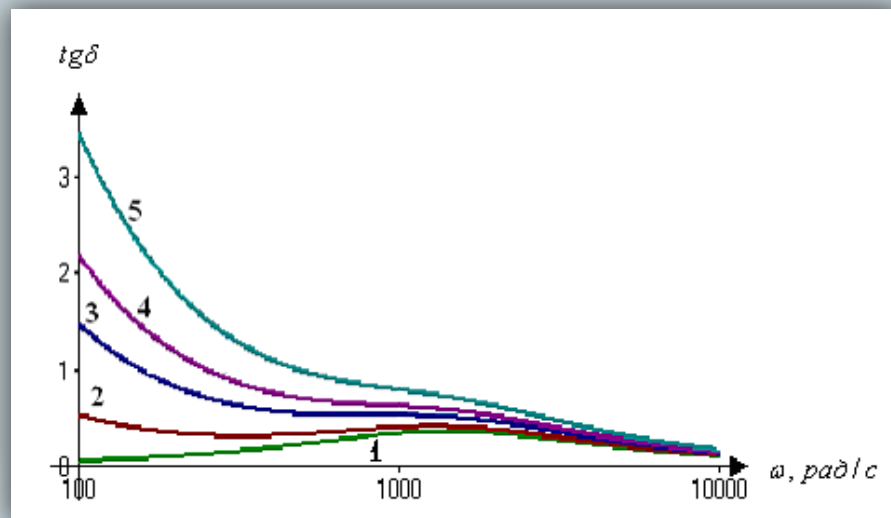
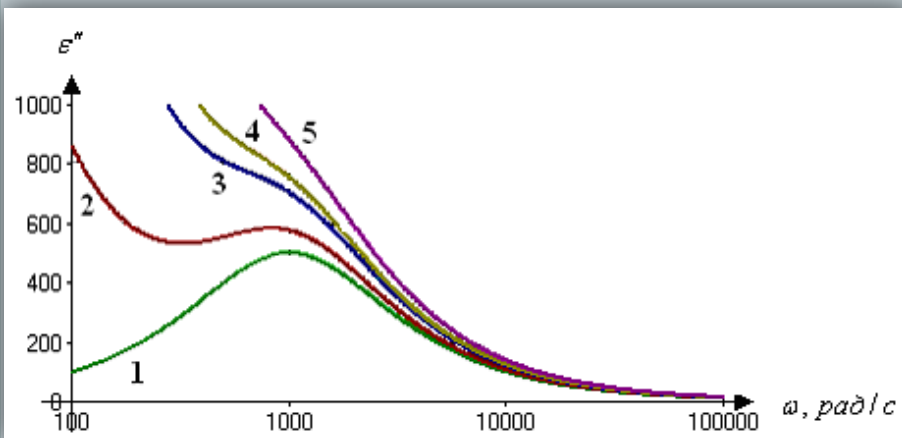


С ростом сквозной электропроводности увеличивается номер кривой

19

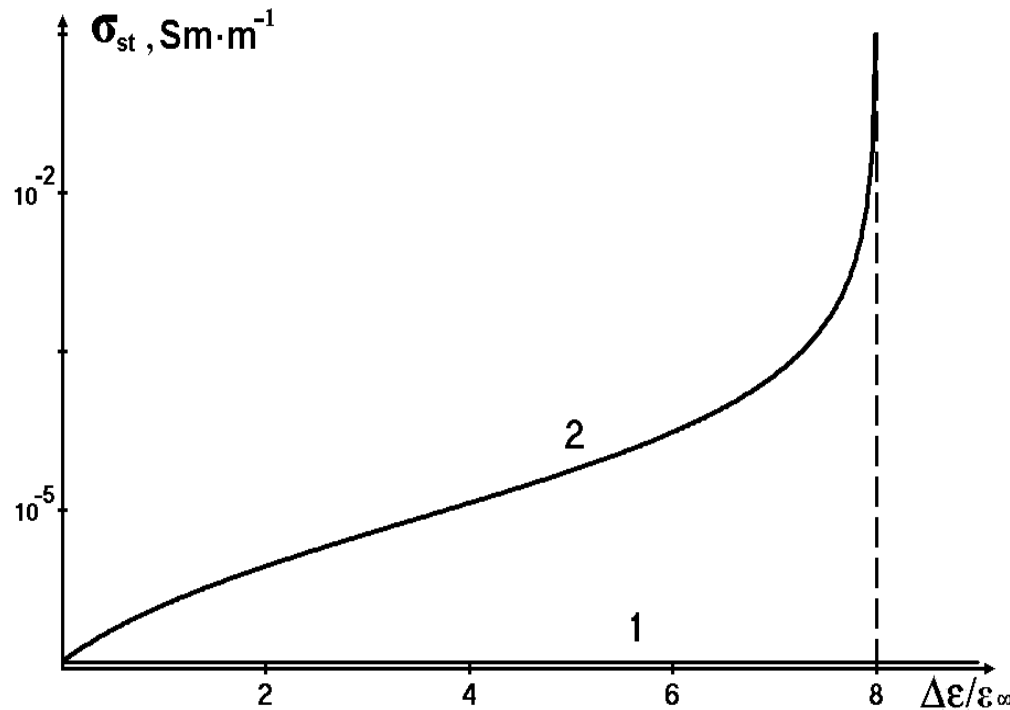
Мнимая часть
диэлектрической
проницаемости

Тангенс угла
диэлектрических потерь



Зависимости σ_{ct1} (1) и σ_{ct2} (2) от отношения $\Delta\varepsilon/\varepsilon_\infty$.
 Дебаевское распределение. $\Delta\varepsilon = 10^3$; $\tau = 10^{-3}$ с.

20



$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma_{cm}}{\varepsilon_0\omega} + \frac{\Delta\varepsilon\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$$\sigma_{cm2} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_\infty\Delta\varepsilon + (\Delta\varepsilon)^2\varepsilon_0}{(8\varepsilon_\infty - \Delta\varepsilon)\tau}$$

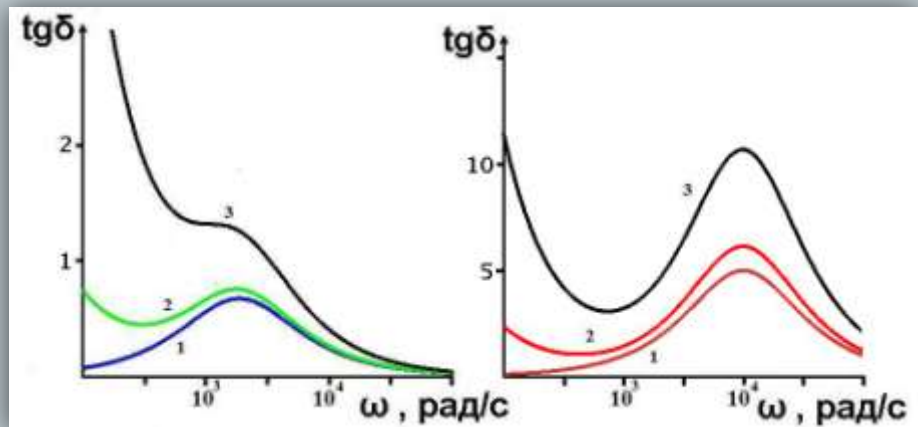
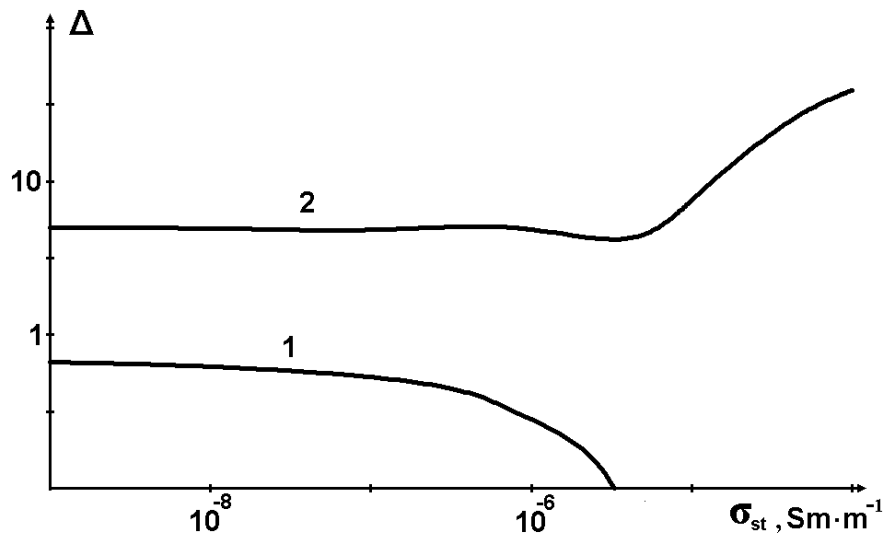
$$\sigma_{cm1} = \frac{\varepsilon_0\Delta\varepsilon}{8\tau}$$

Дебай $\Delta\varepsilon/\varepsilon_\infty=8$

21

- 1 – слабая релаксационная поляризация
- 2 – сильная релаксационная поляризация

С ростом номера кривой увеличивается сквозная электропроводность



Сильная
релаксационная
поляризация.

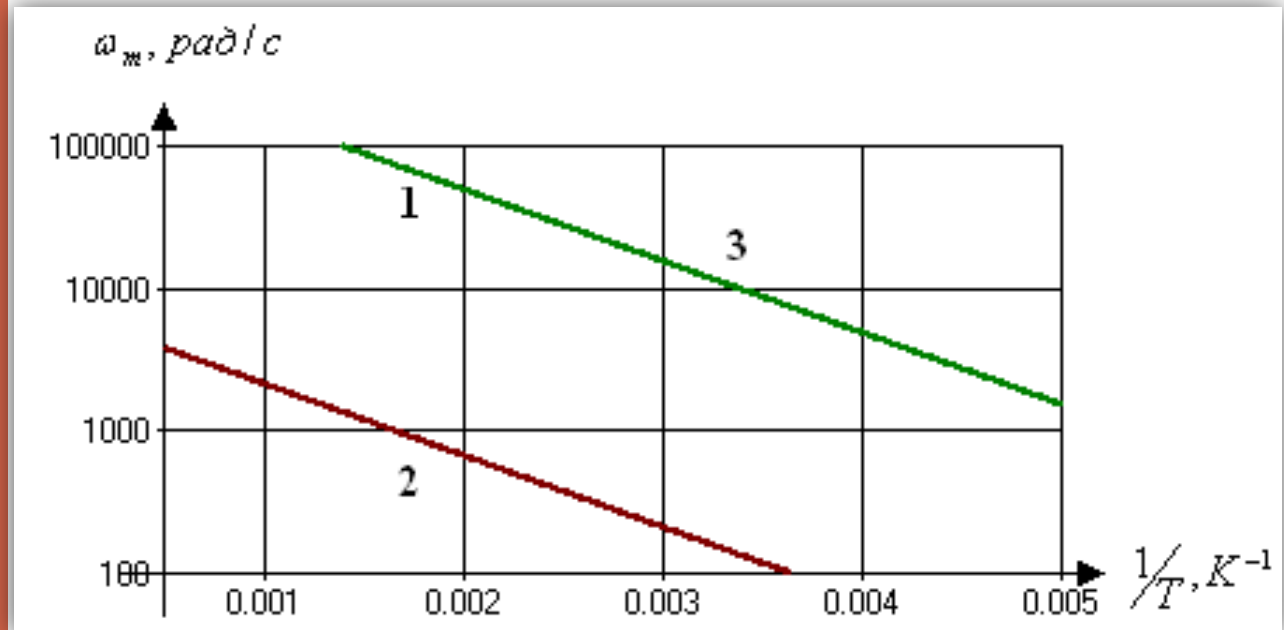
Координаты Аррениуса

1,3 – положение
максимумов

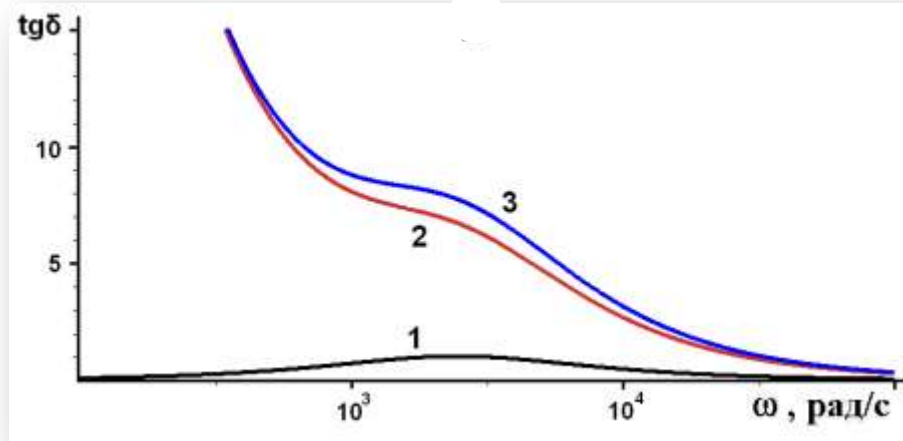
2- положение
минимумов

1,2 – большая сквозная
электропроводность

3 – сквозной
электропроводности
нет

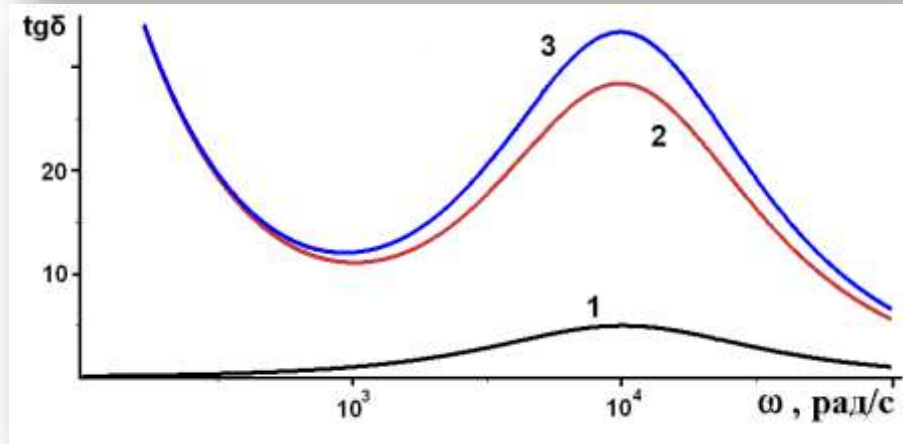


Слабый процесс



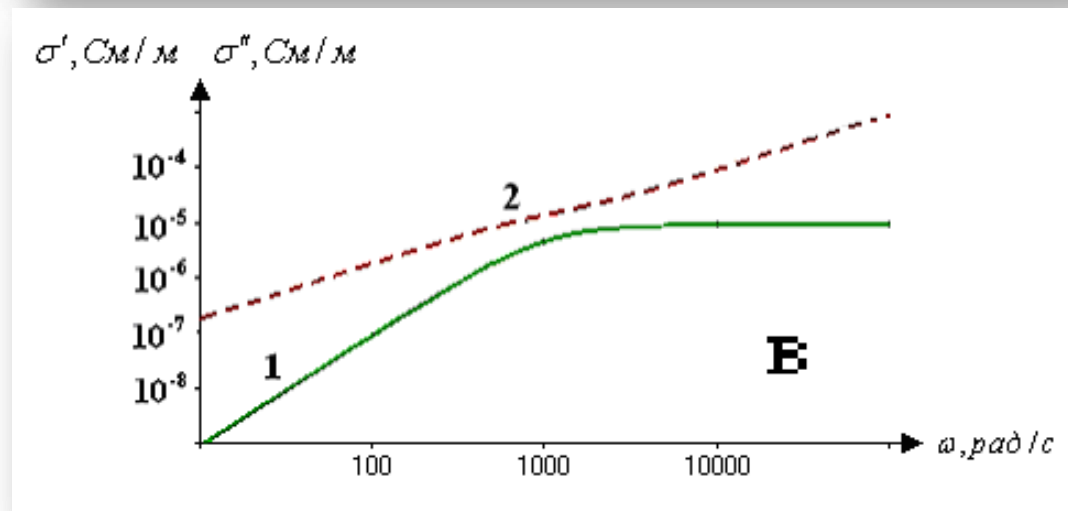
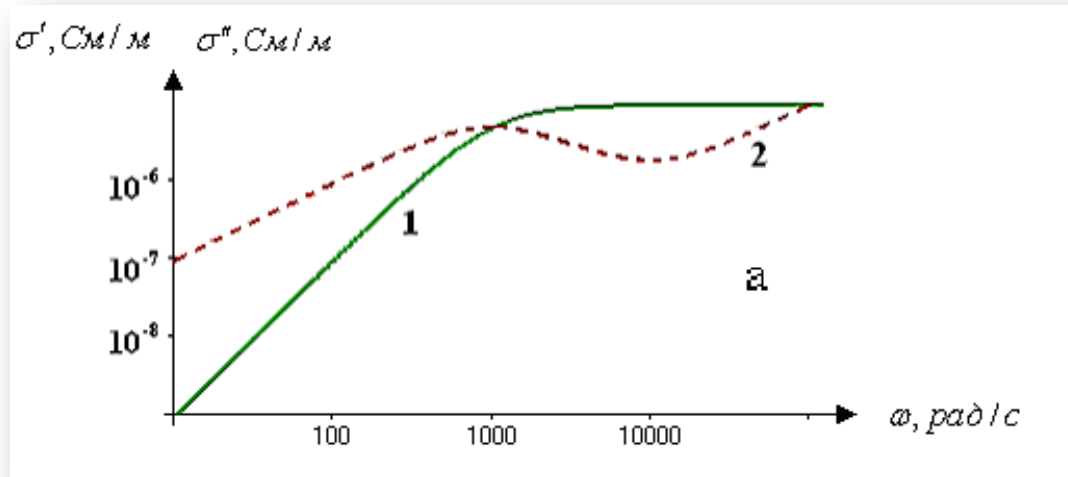
1 - $\text{tg}\delta_B$
 2 - $\text{tg}\delta_A$
 3 - $\text{tg}\delta$

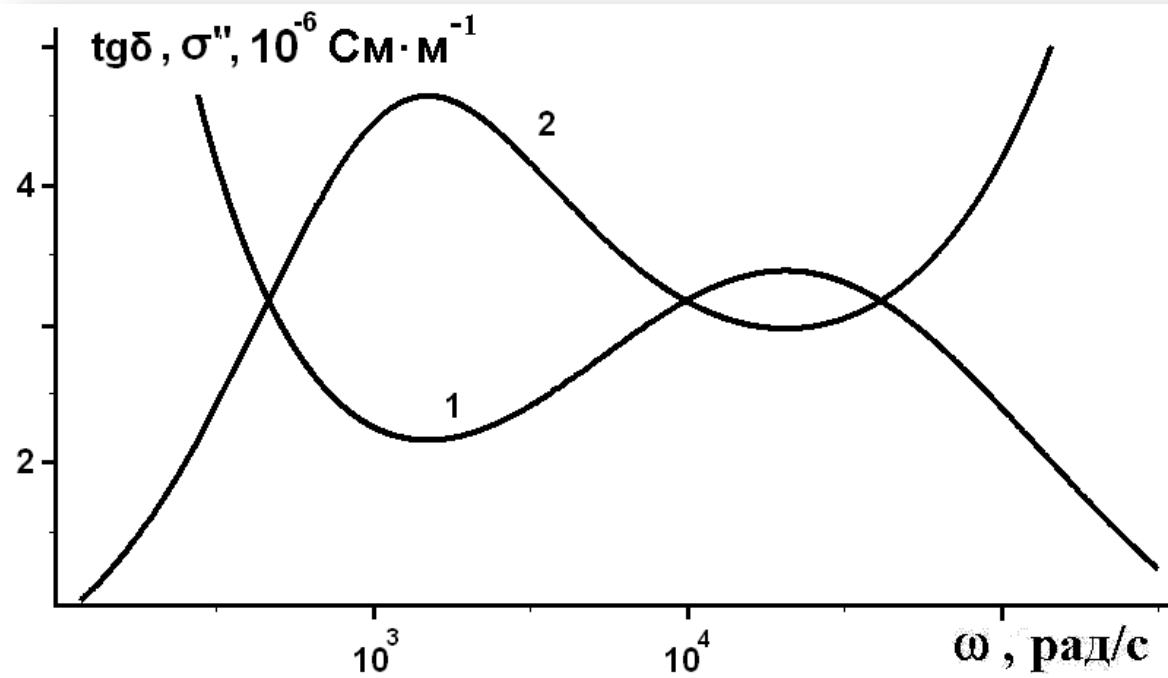
Сильный процесс



$$\text{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\frac{\sigma_{cm}}{\varepsilon_0 \omega}}{\varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + \omega^2 \tau^2}} + \frac{\frac{\Delta\varepsilon \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}}{\varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + \omega^2 \tau^2}} = \text{tg}\delta_A + \text{tg}\delta_B$$

$$\sigma^* = \left(\sigma_{cm} + \frac{\omega^2 \Delta \epsilon \tau \epsilon_0}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) + j \left(\omega \epsilon_0 \epsilon_\infty + \frac{\omega \epsilon_0 \Delta \epsilon}{1 + \omega^2 \tau^2} \right)$$





1 – частотная зависимость $\text{tg}\delta_A$

2 - частотная зависимость σ''

$$\operatorname{tg} \delta_A = \frac{\sigma_{cm} / (\varepsilon_0 \omega)}{\varepsilon_\infty + F(\omega, \Delta\varepsilon, \tau)}$$

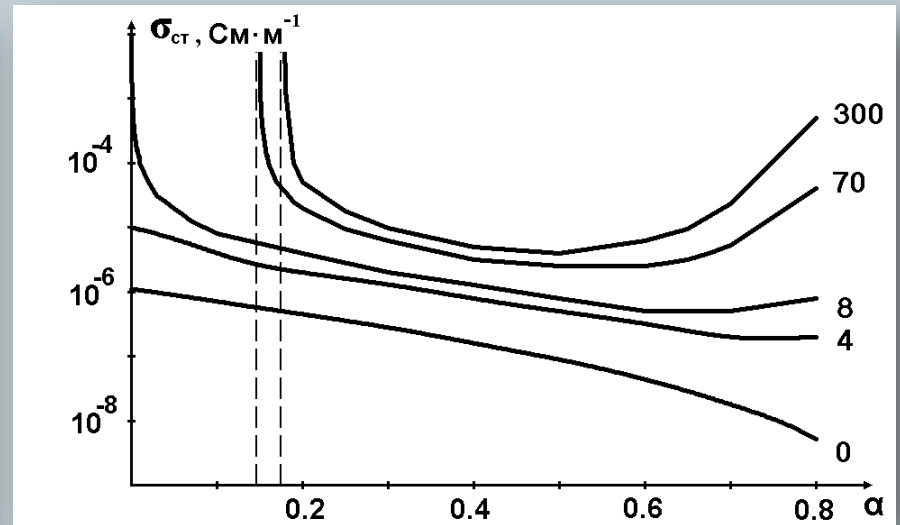
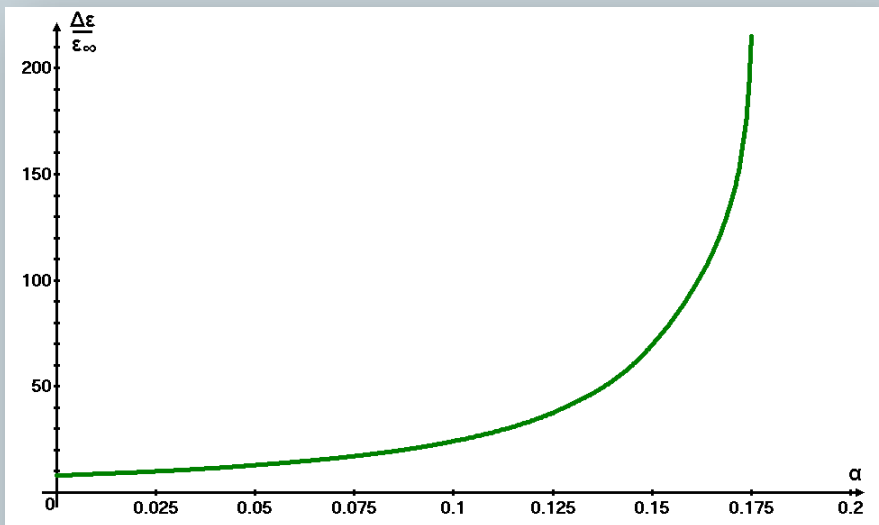
$$\sigma'' = \omega(\varepsilon_\infty + F(\omega, \Delta\varepsilon, \tau))$$

$$\varepsilon' = (\varepsilon_\infty + F(\omega, \Delta\varepsilon, \tau))$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1+(j\omega\tau)^{(1-\alpha)}}$$

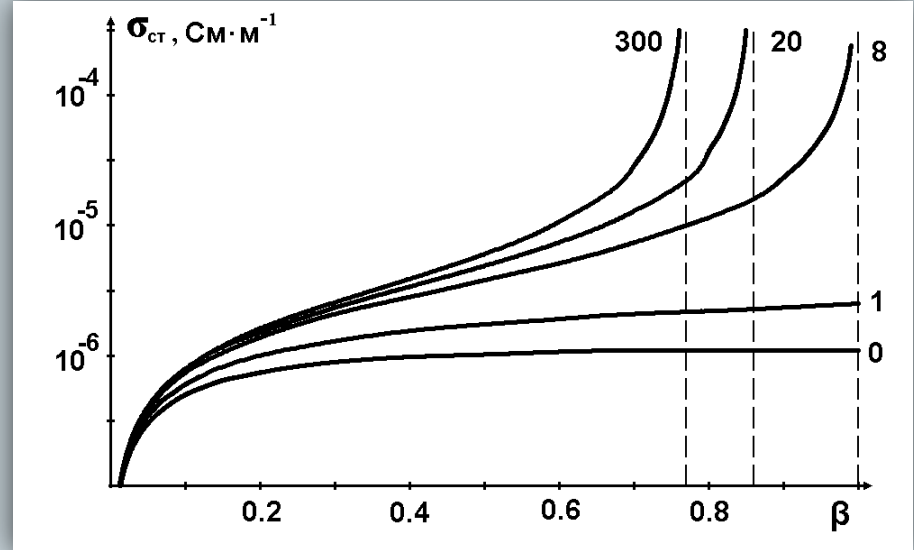
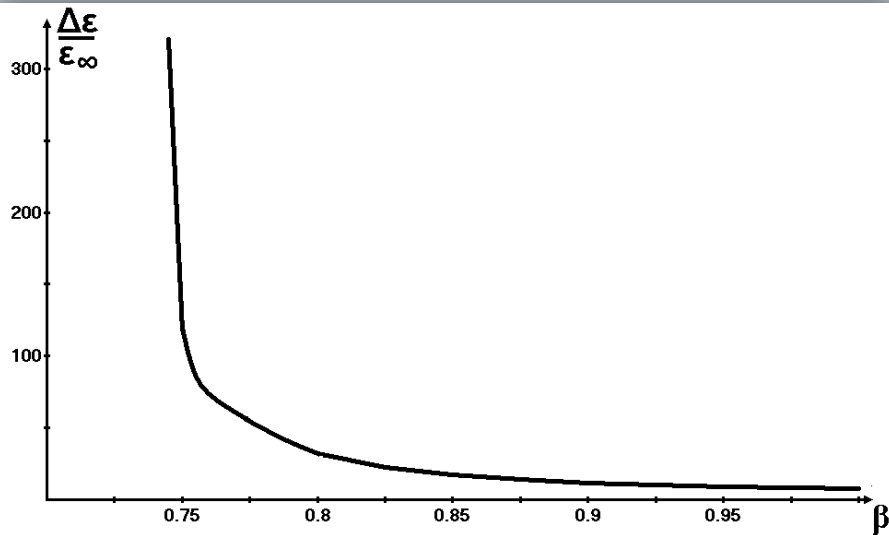
Распределение Коула-Коула

27



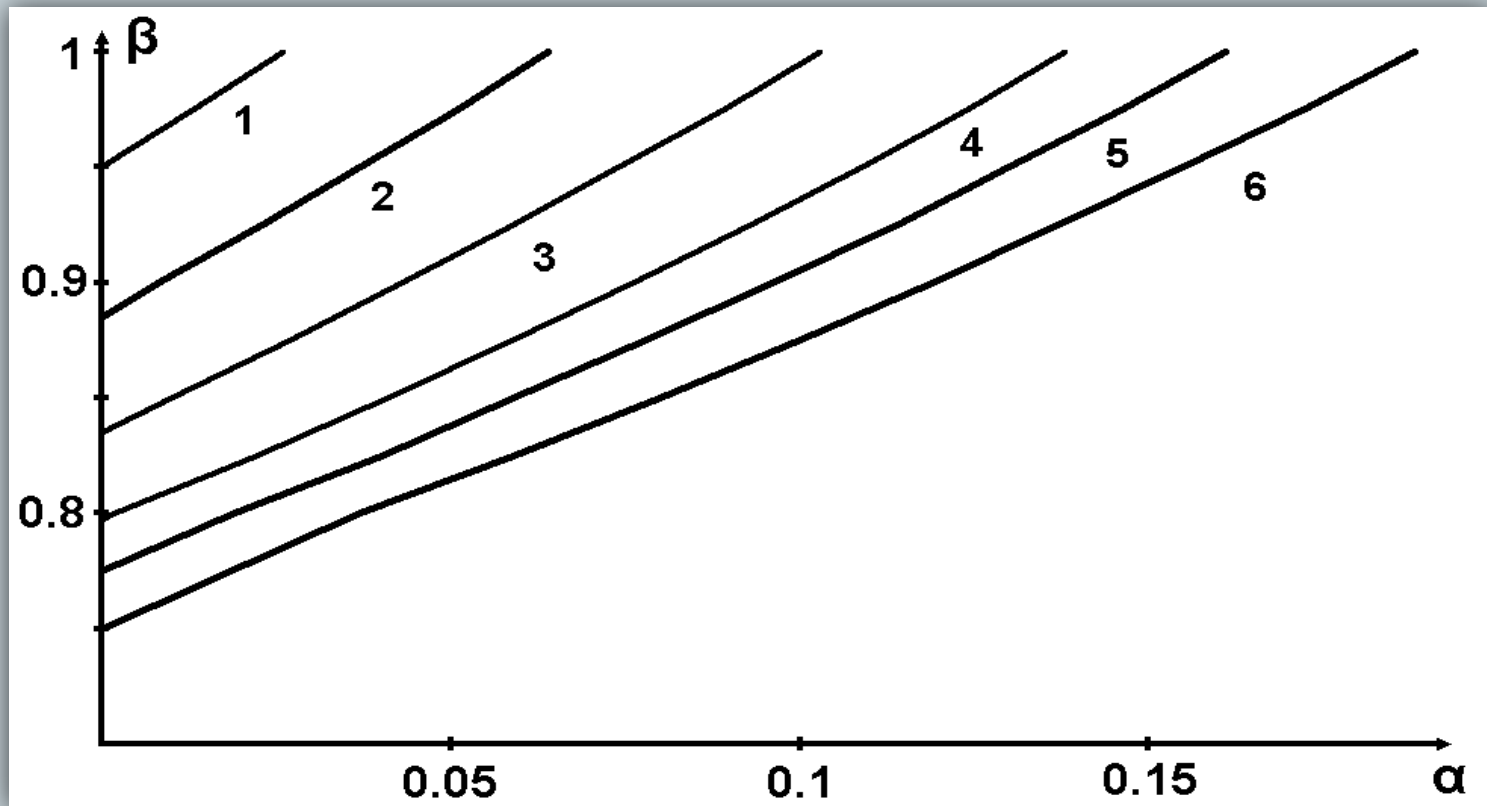
Распределение Дэвидсона-Коула $\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{(1+j\omega\tau)^\beta}$

28



Обобщенное распределение (Гаврильяка-Негами) $\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{(1+(j\omega\tau)^{1-\alpha})^\beta}$

29

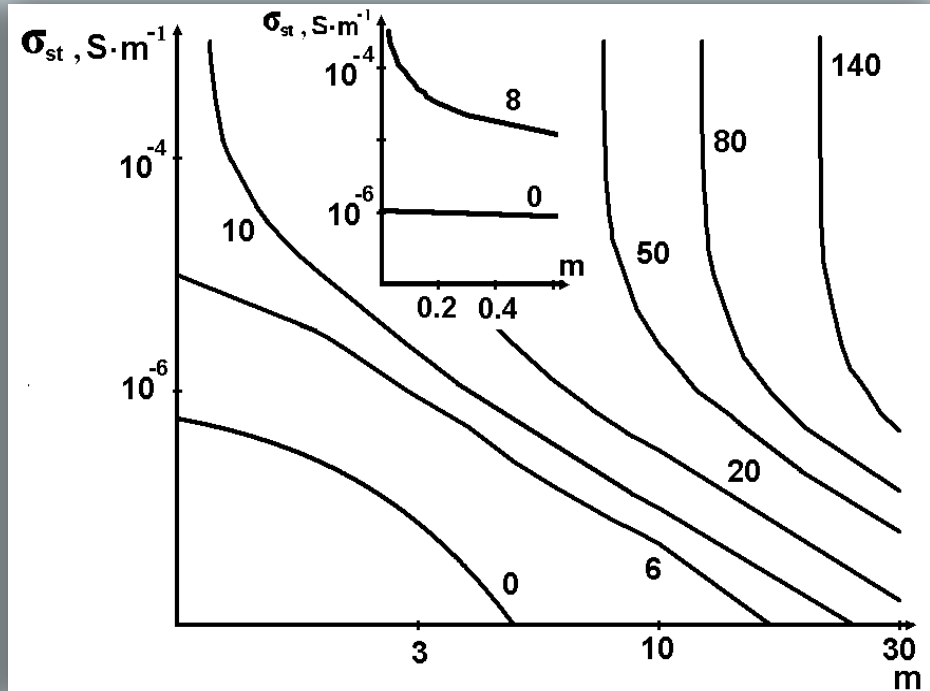
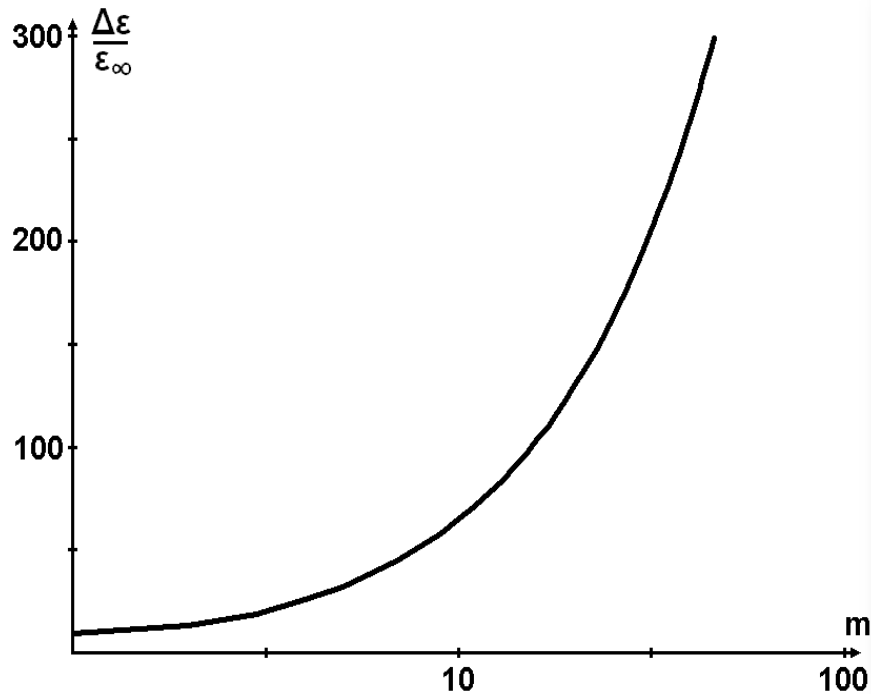


Кривые нарисованы для значений $\Delta\varepsilon/\varepsilon_\infty$ 1-10; 2-15; 3-25; 4-50; 5-100; 6-1000. Справа от кривых слабые релаксационные процессы. Слева - сильные.

Распределение Фрелиха

30

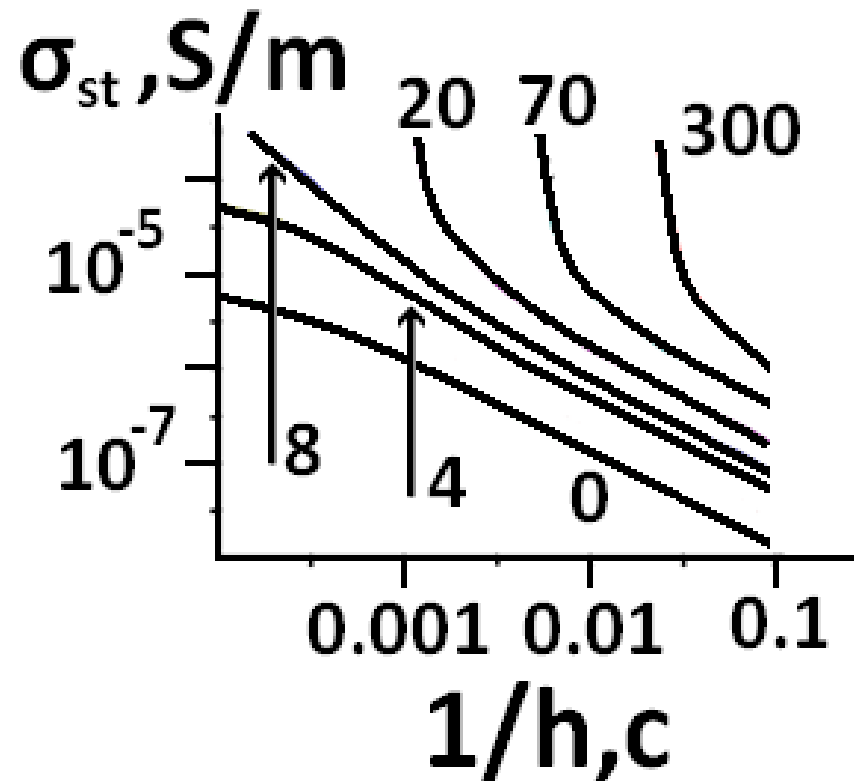
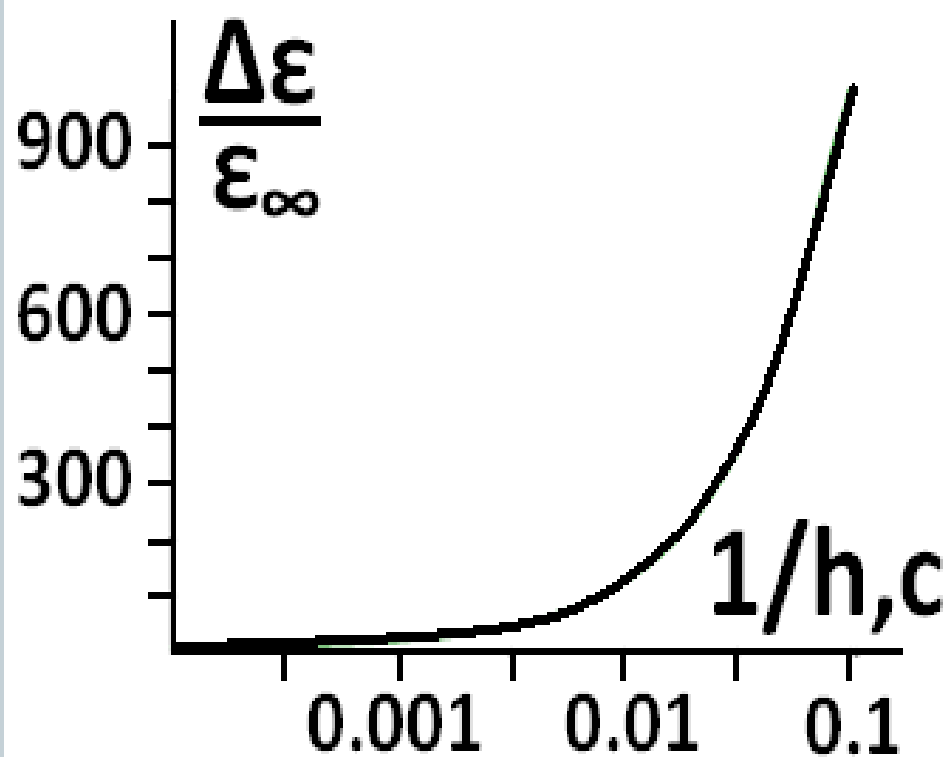
$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \Delta\varepsilon \left[1 - \frac{1}{2m} \ln \left(\frac{1 + \omega^2 \tau_0^2 e^{2m}}{1 + \omega^2 \tau_0^2} \right) \right]; \varepsilon'' = \Delta\varepsilon \frac{1}{m} [\operatorname{arctg}(\omega \tau_0 e^m) - \operatorname{arctg}(\omega \tau_0)]; m = \frac{v_0}{kT}$$

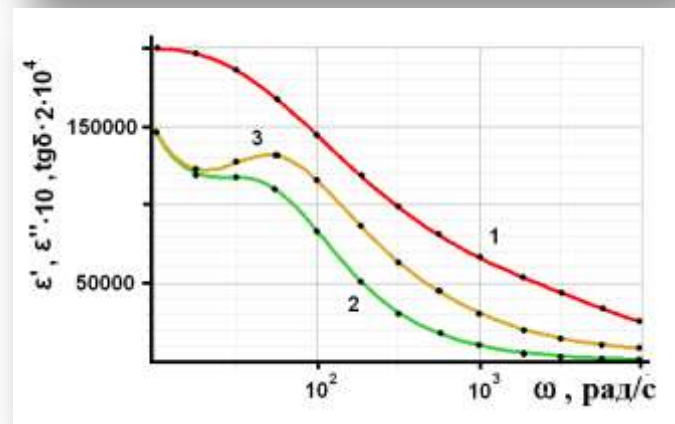
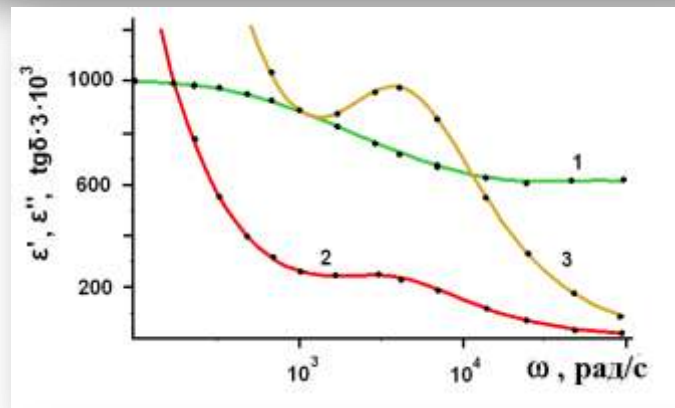
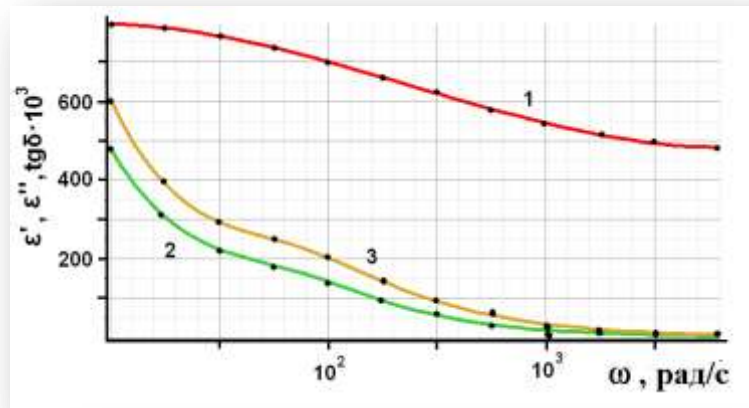


Равновероятное распределение

31

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \Delta\varepsilon \frac{h}{\omega} (\operatorname{arctg} \omega \tau_2 - \operatorname{arctg} \omega \tau_1); \quad \varepsilon'' = \Delta\varepsilon \frac{h}{2\omega} \ln \frac{1 + \omega^2 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_1^2}; \quad h = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1}.$$

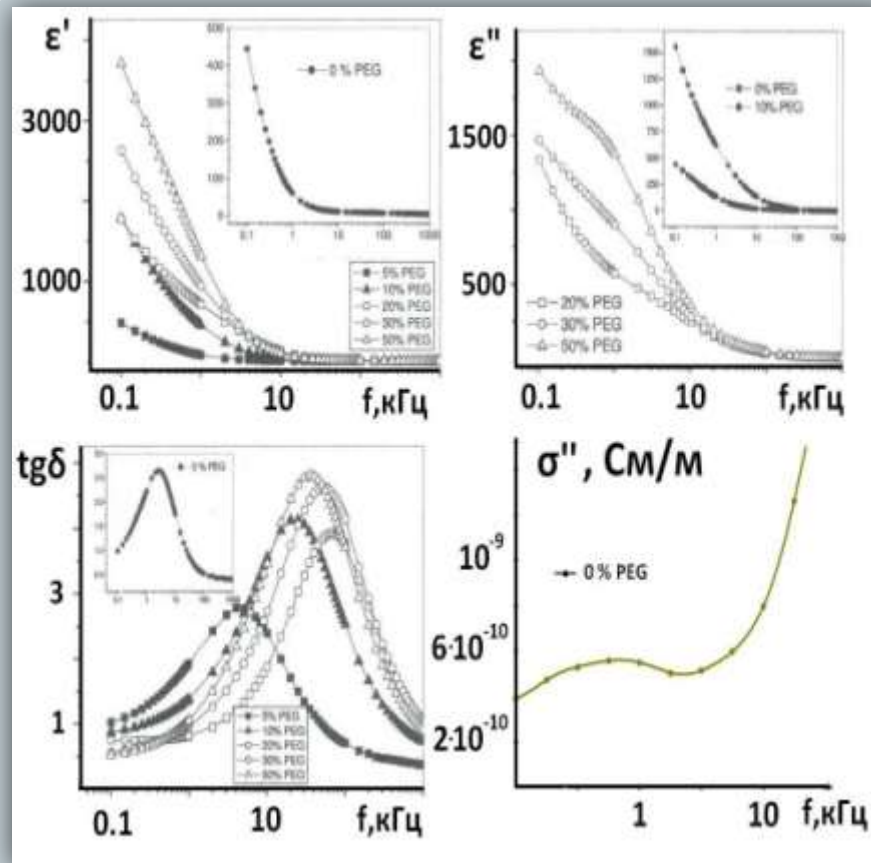




Пластифицированные полимеры нанокомпозитных электролитов

33

1. Wang Ying, Ni Lei, Chen Xiang Ming// *J.Mater Sci : Mater Electron*/2010. DOI 10.1007/s 10884-010-0140-9.
2. Малышкина, И.А., Бурмистров С.Е., Гаврилова Н.Д. // *Высокомолек.соед., сер.Б.* 2005. Т.47,№8. С. 1563.
3. Gopalan E Veena, Malini K. A., Kumar D Sakthi, Yoshida Yasuhiko, Al-Omari I .A., Saravanan S., Anantharaman M .R.// *J. Phys.: Condens. Matter.* 2009. V.21. 146006.
4. Feng L., Ye Z.-G.// *Journal of Solid State Chemistry.*2002. V.163. P.484.
5. Dillip K. Pradhan, R. N. P. Choudhary, B. K. Samantaray. // *Int. J. Electrochem. Sci.-2008.-* V.3.-P.597-608.

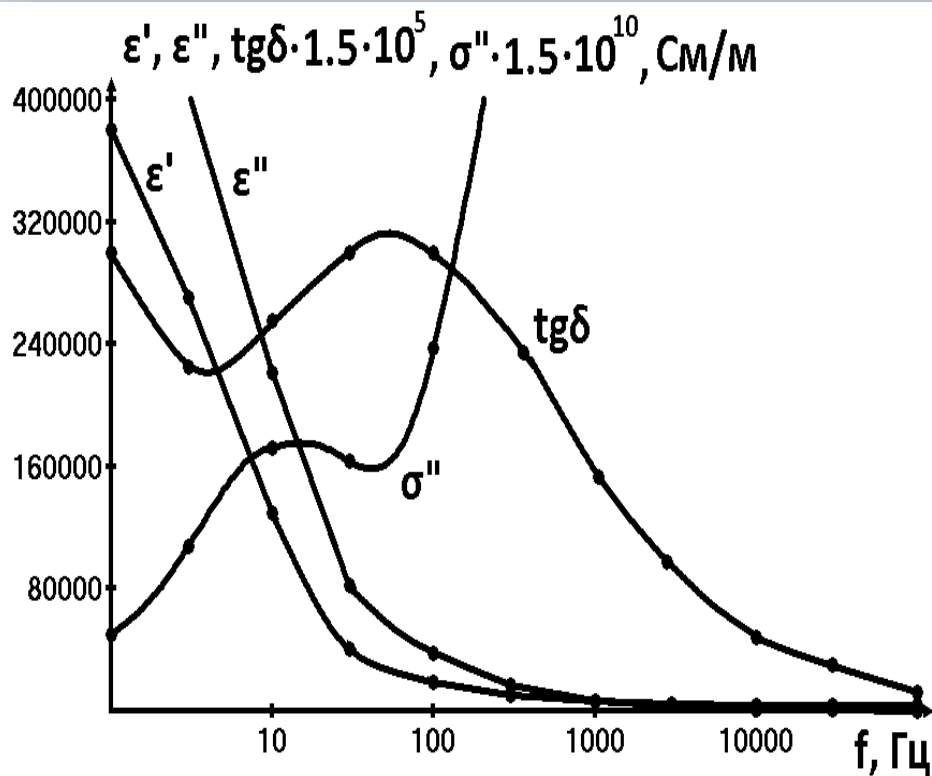


Диэлектрические спектры пластифицированных нанокомпозитных полимеров(PNCE) (при различных концентрациях полиэтилен гликоля (PEG). Температура комнатная. PEG ((PEO)₂₅-NaClO₄+5wt.% DMMT + xwt.%PEG200). PEO – Полиэтилен оксида – (CH₂CH₂O)_n.

Приведено по [5].

Диэлектрические спектры керамических образцов $\text{Ca}_{1-3x/2}\text{Nd}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

34



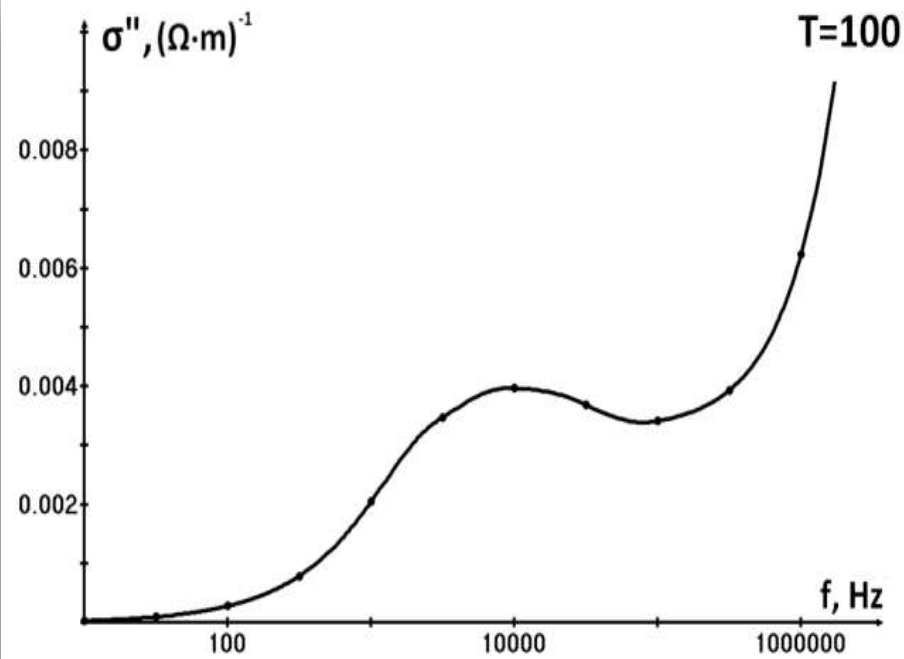
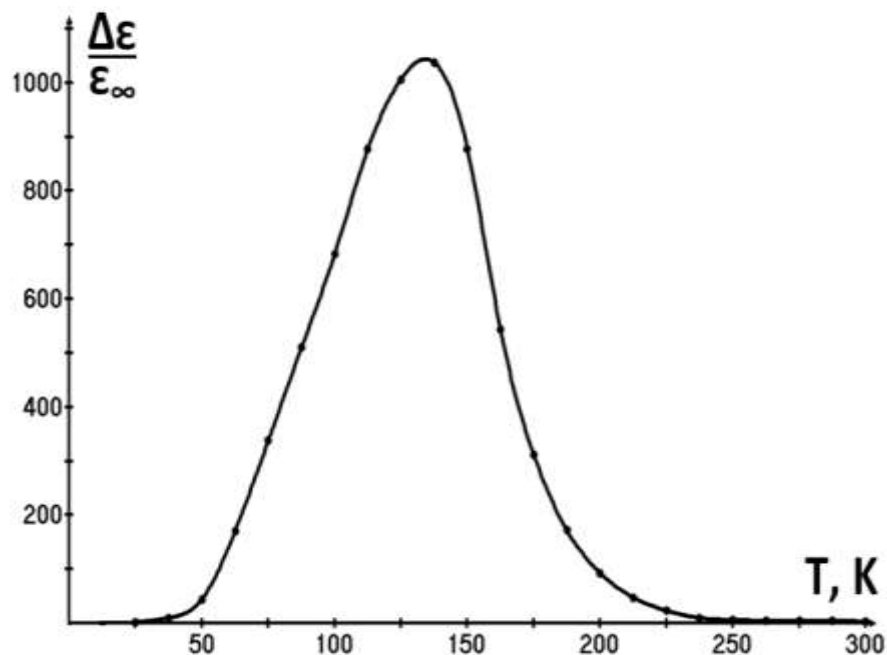
1. Yanez-Vilar S., Castro-Couceiro A., Rivas-Murias B., Fondado A., Mira J., Rivas J., Senaris-Rodriguez M.A. // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2005. V.631. P. 2265.
2. Abdullah Mustaffa Hj., Yusoff Ahmad Nazlim // *Pertanika J. Sci. & Technol.* 1998. V.6, №2. P.95.
3. Васильев А.Н., Волкова О.С. // *Физика низких температур.* 2007. Т.33, №11. С.1181.
4. Rivas-Murivas B., Mira J., Fondado A., Senaris-Rodrigues M.A., Rivas J. // *Bol. Soc. Esp. Ceram.* 2006. V.45, №3. P.169
5. Wang Ying, Ni Lei, Chen Xiang Ming // *J. Mater Sci : Mater Electron* / 2010. DOI 10.1007/s 10884-010-0140-9.

Расчеты проведены по данным [5].

Температурная зависимость $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ и частотная зависимость σ'' (температура 100К) для сегнетоэлектрика-релаксора $(\text{NbSe}_4)_3\text{I}$

35

*Расчеты проведены по экспериментальным данным работы
Staresinic D., Lunkenheimer P., Hemberger J., Briljakovic K., Loidl A.
Physical Review Letters.2006.V.96.046402.*



- 1. В диэлектриках с большой сквозной электропроводностью и большой релаксационной поляризацией возможны два вида частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь: с экстремумами и без экстремумов. В первом случае релаксационная поляризация названа сильной, во втором – слабой. В частотных зависимостях мнимой части комплексной проводимости для диэлектриков экстремумы имеются только при развитии сильной релаксационной поляризации.**

2. Причиной перехода от слабой релаксационной поляризации к сильной является увеличение относительного вклада в поляризованность диэлектрика релаксационной (медленной) поляризации, по сравнению с быстрыми поляризационными процессами.

3. Экстремумы в частотных зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь для недебаевских диэлектриков сохраняются при бóльших величинах сквозной электропроводности, чем экстремумы в частотных зависимостях мнимых частей диэлектрической проницаемости, что позволяет обнаруживать релаксационную поляризацию по частотным зависимостям тангенса угла диэлектрических потерь при бóльших величинах сквозной электропроводности, чем по частотным зависимостям мнимых частей диэлектрической проницаемости.

Гигантское увеличение диэлектрической проницаемости и проводимости

39

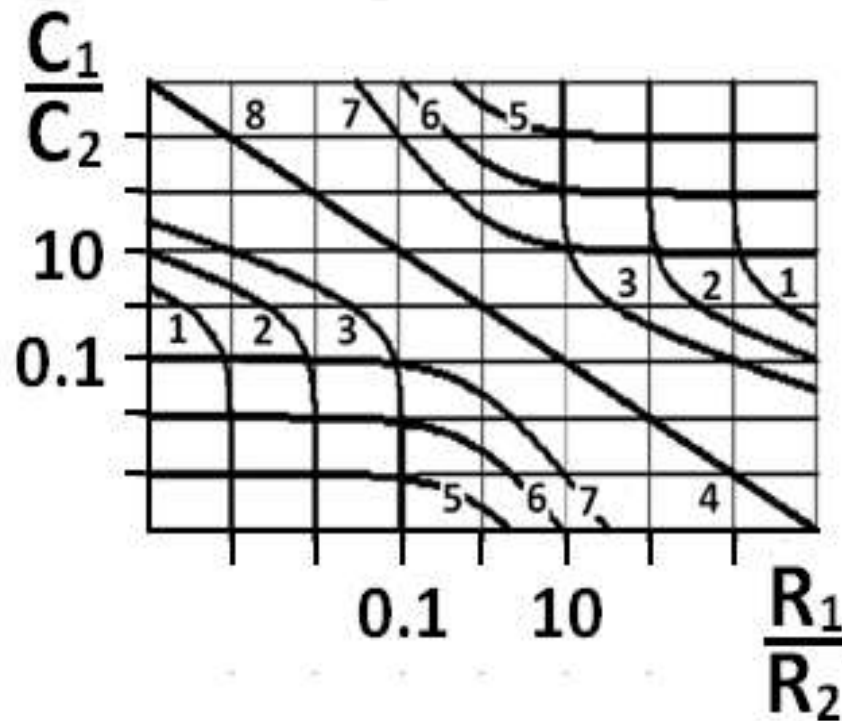
$$G = \frac{R_1 + R_2 + \omega^2 (\tau_1^2 R_2 + \tau_2^2 R_1)}{(R_1 + R_2)^2 + \omega^2 (\tau_2 R_1 + \tau_1 R_2)^2}$$

$$C = \frac{\tau_1 R_1 + \tau_2 R_2 + \omega^2 (\tau_1 \tau_2 (\tau_2 R_1 + \tau_1 R_2))}{(R_1 + R_2)^2 + \omega^2 (\tau_2 R_1 + \tau_1 R_2)^2}$$

- $\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = R_2 C_2$

$$K_G = \frac{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2} + \frac{C_2}{C_1} + \frac{C_1}{C_2} + \frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}}{2 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{C_1}{C_2}}$$

$$K_C = \frac{\frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_2}{C_1} \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_1}{R_2} \frac{C_1}{C_2}}{2 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1}}$$



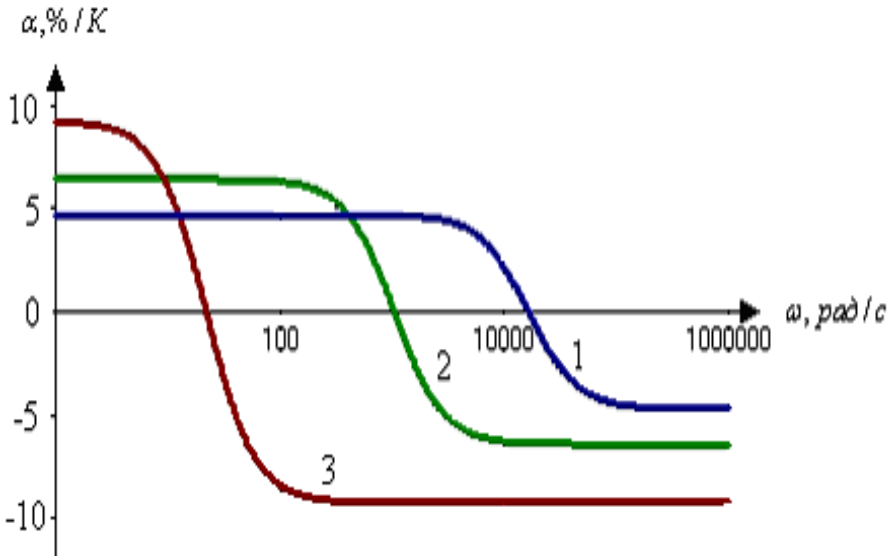
Линии равных K_G (1, 2, 3, 4) и K_C (5, 6, 7, 8). 1 - $K_G=1000$, 2 - $K_G=100$, 3 - $K_G=10$, 4 - $K_G=1$, 5 - $K_C=1000$, 6 - $K_C=100$, 7 - $K_C=10$, 8 - $K_C=1$

Частотное управление температурным коэффициентом сопротивления.

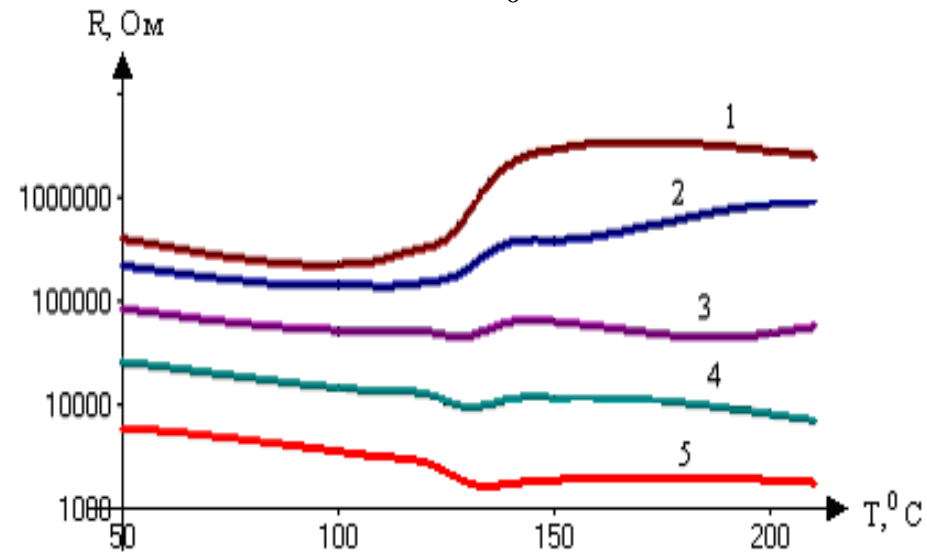
40

$$\rho = \frac{1 + \omega^2 \tau_0^2 e^{2U/kT}}{\Delta \varepsilon \omega^2 \varepsilon_0 \tau_0 e^{u/kT}}$$

$$\alpha = \frac{1 - \omega^2 \tau_0^2 e^{2U/kT}}{1 + \omega^2 \tau_0^2 e^{2U/kT}} \frac{U}{kT^2}$$



• Частотные зависимости температурного коэффициента сопротивления для 1 – T=350 К, 2 – T=300 К, 3 – T=250 К. U=0.5 эВ



- Температурные зависимости сопротивления позистора на основе полупроводникового титаната бария с добавкой 0.2 ат.%Er, измеренного на различных частотах. 1 – 10 Гц, 2 – 100 Гц, 3 – 1 кГц, 4 – 10 кГц, 5 – 100 кГц

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ**