

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ, ПРОВЕДЕННЫЕ В г. ТОМСКЕ ДО 1957 г.

А. А. ВОРОБЬЕВ

Введение

До организации СФТИ в г. Томске проф. В. Д. Кузнецов с сотрудниками проводил научные исследования по механическим свойствам и кристаллизации ионных диэлектриков, электрическим свойствам твердых и жидких диэлектриков и полупроводников. После организации СФТИ под руководством проф. В. Д. Кузнецова и проф. М. А. Большаниной были развернуты большие исследования механических свойств твердых тел.

В СФТИ в 1930 г. проф. П. С. Тартаковским с сотрудниками были начаты теоретические и экспериментальные исследования электронных явлений в диэлектриках и полупроводниках. Разработка теории механических свойств ионных структур, их устойчивости и других проблем теории твердого тела, начатая проф. П. С. Тартаковским, продолжалась под руководством В. А. Жданова.

Проф. В. Н. Кессених в тридцатых годах в СФТИ начал исследования свойств диэлектриков в полях высокой частоты, разработку методов исследования и установок; доц. А. М. Вендерович — изучение электропроводности и ионных процессов в твердых диэлектриках; доц. М. И. Корсунский — действие электронных пучков и рентгеновских лучей на диэлектрики и др.

С 1935 г. К. А. Водопьяновым были организованы в СФТИ лаборатория диэлектрических потерь и А. А. Воробьевым совместно с А. К. Красиным — высоковольтная, в которых были развернуты также исследования изоляционных материалов и конструкций.

С 1939 года А. А. Воробьевым были начаты научные исследования по диэлектрикам и изолирующим материалам и конструкциям в Томском политехническом институте. С 1954 г. под руководством Н. И. Воробьева на кафедре изоляционной и кабельной техники ведутся исследования свойств изоляционных материалов, а П. А. Савинцевым на кафедре физики — физических свойств изолирующих кристаллов.

Научные исследования по диэлектрикам и электрической изоляции еще больше развернулись в ТПИ с 1957 г. после организации лаборатории диэлектриков, полупроводников и электроники.

Большую роль в развитии научных исследований имели научные семинары по диэлектрикам, регулярно работавшие в СФТИ уже в тридцатых годах, а в ТПИ с 1950 года.

Электронные переходы в диэлектриках

Энергетическая схема электронных уровней

(А. А. Воробьев, Н. К. Калабухов, И. К. Куршев, В. М. Кудрявцева, В. Ф. Поддубный, Л. М. Ревердатто, П. С. Тартаковский, Н. Н. Феденев, Б. М. Фишелев и др).

В тридцатых годах в СФТИ были исследованы фотоэлектрические явления в кристаллах серы и щелочно-галогидных солей и построена схема электронных уравнений для последних. Результаты этих исследований были описаны в монографии П. С. Тартаковского «Внутренний фотоэффект в диэлектриках».

Кристаллические счетчики. В 1935 году Е. К. Завадовская показала, что гамма-излучение вызывает люминесценцию кристаллов кварца, флюорита, каменной соли, сильвина, кальцита. Таким образом, был построен кристаллический счетчик жесткого излучения, получивший теперь широкое распространение.

Флуоресценция в сильных электрических полях

(А. В. Астафуров, А. А. Воробьев, В. Д. Кучин)

Экспериментальным путем обнаружить расширение электронных зон в кристаллах при действии сильных электрических полей не удалось. Обнаружена люминесценция кристаллов щелочно-галогидных солей в сильных полях. В кристаллах льда с большим числом примесей в электрическом поле наблюдается сильная люминесценция.

Действие излучения на диэлектрики

(А. А. Воробьев, А. Ф. Калганов, Б. А. Кононов, В. А. Москалев, А. Д. Шелоков).

Многие кристаллы при действии быстрых электронов с энергией несколько Мэв и жесткого излучения и после его прекращения светятся характерным для них видимым светом. Электронной бомбардировкой каменная соль окрашивается в коричневый, а сильвин — в фиолетовый цвет. Плотность окраски возрастает с числом электронов, бомбардировавших кристалл. Для получения четких рисунков электронного пучка необходимо окрашивание до плотности почернения, равной 2, что происходит, если на кристалл попадет до 10^{14} электронов. Окраска кристаллов, выращенных из расплава, наступает при меньших дозах, чем окраска природной каменной соли.

Кристаллы после облучения их электронами флуоресцируют.

Массовые коэффициенты поглощения рентгеновских лучей с эффективной длиной волны 0,22 ангстрема в щелочно-галогидных монокристаллах составляют (в квадратных см на грамм):

Фтористый литий	0,176
Хлористый натрий	0,380
Хлористый калий	0,545
Бромистый калий	2,152
Бромистый натрий	2,00
Хлористый рубидий	2,56
Иодистый калий	5,11

Массовый коэффициент поглощения не имеет линейной связи с плотностью и молекулярным весом. С ростом этих величин массовый коэффициент поглощения растет. С ростом энергии кристаллической решетки массовый коэффициент поглощения в общем уменьшается.

Степень поглощения рентгеновских лучей в кристаллах определяется постоянной поглощения, не зависящей от длины волны поглощаемых лучей в большом интервале длин волн.

Введено понятие эффективного (по отношению к поглощению рентгеновских лучей) числа электронов в молекуле соединения, определяющего степень поглощения рентгеновских лучей, практически равного аддитивно полученному числу электронов в молекуле.

Постоянная поглощения для интервала длин волн $0,3 \div 0,03$ ангстрем определяется через эффективное число электронов в молекуле в степени 2,58.

Массовый коэффициент поглощения для данной длины волны пропорционален постоянной поглощения. Коэффициент пропорциональности зависит от длины волны в степени 2,8.

Линейный коэффициент поглощения рентгеновских лучей в кристаллах твердых растворов в зависимости от состава приближенно подчиняется закону аддитивности. Имеющаяся незначительная положительная неаддитивность вблизи эквимолярного состава находится в согласии с отрицательной неаддитивностью для постоянной решетки.

Значительная зависимость линейного коэффициента поглощения рентгеновских лучей в твердых растворах от их состава может быть использована для определения состава по поглощению.

Постоянная поглощения твердых растворов образуется аддитивно из констант поглощения компонент. Линейность массового коэффициента поглощения в зависимости от константы поглощения сохраняется и для твердых растворов.

Определяя массовые коэффициенты поглощения постоянной решетки, можно находить зависимость числа частиц в элементарной ячейке от состава.

При комнатных температурах проводимость кристаллов щелочно-галлоидных солей при облучении рентгеновскими лучами возрастает в 10—100 раз. С ростом температуры эффект возрастания уменьшается и исчезает при температурах 80—100 градусов Цельсия.

Исключение представляет кристалл фтористого лития, проводимость которого при облучении и при низких температурах незначительно понижается.

Естественная каменная соль увеличивает проводимость во время облучения в тысячу—десять тысяч раз сильнее, чем монокристалл, искусственно выращенный из расплава.

При постоянной температуре энергия активации возрастает с ростом энергии кристаллической решетки и убывает с ростом массового коэффициента поглощения рентгеновских лучей в кристалле.

При измерениях слабых токов в облучаемых рентгеновскими лучами кристаллах щелочно-галлоидных солей между измерительным электродом и землей возникает разность потенциалов, не связанная с проводимостью кристалла, обусловленной явлением внешнего фотоэффекта с измерительного электрода. Электрод (платиновый), изолированный от земли, облученный рентгеновскими лучами, заряжается положительно до 3 вольт относительно земли (фото-э.д.с.).

Система двух электродов в вакууме, один из которых изолирован от земли и облучается электромагнитным излучением, другой—заземлен и не облучается, является новым видом источника э.д.с., работающим за счет энергии квантов излучения.

Величина фото-э.д.с. не зависит от интенсивности облучения, а определяется максимальной энергией кванта (при неоднородном излучении)

и равна максимальной энергии кванта за вычетом работы выхода фотоэлектронов, деленной на заряд электрода (при облучении рентгеновскими лучами—десятки и сотни кв.).

Внутреннее сопротивление источника фото-э.д.с. (при облучении рентгеновскими лучами) пропорционально энергии кванта и обратно пропорционально интенсивности облучения.

Мощность короткого замыкания источника фото-э.д.с. определяется произведением максимальной энергии фотоэлектрона на число вырываемых фотоэлектронов в сек, т. е. пропорциональна максимальной энергии кванта и интенсивности облучения, и при облучении рентгеновскими лучами достигает микроватт.

При замыкании источника фото-э.д.с. на сопротивление часть фотоэлектронов, находящаяся в некотором интервале энергий, верхней границей которого является максимальная энергия фотоэлектронов, попадает на заземленный электрод, образуя ток внутренней цепи источника, и с заземленного электрода через нагрузку подтекает такое же количество электронов в сек, образуя ток внешней цепи. Потенциал изолированного электрода даже при нагрузках в десятки мегомов снижается. С уменьшением сопротивления нагрузки действующий энергетический интервал расширяется за счет смещения нижней границы интервала в сторону меньших энергий фотоэлектронов. Ток в цепи в этом случае возрастает, напряжение на внешней нагрузке уменьшается, мощность, выделяемая на нагрузке, возрастает до максимума при некотором сопротивлении и при дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки мощность спадает до нуля (при коротком замыкании).

Ток в цепи, напряжение и мощность на нагрузке математически выражаются через функцию распределения фотоэлектронов по энергиям. Нахождение последней представляет основную трудность в расчетах конкретных случаев.

Показана возможность практического осуществления непосредственной трансформации энергии электромагнитного излучения в электрическую, основанная на явлении внешнего фотоэффекта. Например, гамма-излучение атомных реакторов может быть использовано для получения высоких напряжений с помощью соответствующих «фотобатарей».

При электрометрических измерениях в условиях облучения необходимо учитывать наличие возникающей фото-э.д.с. на электродах.

Влияние различных факторов на электрическую прочность диэлектриков

Влияние материала электродов на электрическую прочность

(А. А. Воробьев, А. К. Красин)

Электрическая прочность диэлектриков в тонких слоях в однородных и неоднородных полях не зависит от материала электрода. При толщине диэлектрика порядка 10 мм электрическая прочность ниже при употреблении катода из металла с меньшей работой выхода электронов.

В однородном электрическом поле пробивное напряжение диэлектриков в зависимости от толщины изменяется линейно. В неоднородных электрических полях пробивное напряжение на статическом и импульсных напряжениях растет с толщиной слоя диэлектрика медленнее, чем по закону линейной зависимости.

В области теплового пробоя кристаллов каменной соли линейная зависимость пробивного напряжения от толщины образца наблюдается в большом интервале толщин.

Кристаллографическая направленность разрядов

(А. В. Астафуров, А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, В. Д. Кучин,
К. К. Сончик)

При отрицательной полярности острия разряд в щелочно-галонидных кристаллах распространяется преимущественно по направлению ребра куба, а положительной — преимущественно по диагонали грани и диагонали куба. Наличие механических напряжений и повреждений в объеме кристалла нарушает пути разряда.

Максимальная электрическая прочность каменной соли в однородном поле при толщине порядка полмиллиметра, наибольшая по ребру куба, меньше по диагонали грани и самая наименьшая по диагонали куба. Средняя электрическая прочность не зависит от кристаллографического направления. Электрическая прочность по ребру куба на 10 процентов выше прочности по диагонали куба.

Пробивное напряжение при отрицательном острие и импульсном напряжении по диагонали грани на 20 процентов ниже, чем по ребру куба. При положительном острие и импульсном напряжении пробивные напряжения по трем главным кристаллографическим направлениям одинаковы.

Измерение токов перед пробоем

(Г. А. Андреев, А. К. Красин)

На заданном высоком напряжении, близком к пробивному, ток через диэлектрик возрастает со временем. Наблюдается прямая зависимость логарифма предпробивного тока от температуры для щелочно-галонидных кристаллов. В области температур 20—180 градусов прямая имеет больший наклон, чем в области температур 180—440 градусов.

В широком температурном интервале (от 20 до 440 градусов) ток в зависимости от относительной напряженности электрического поля в образце изменяется по экспоненте. В области температур 20—180 градусов предпробивной ток не зависит от толщины образцов. При температурах выше 200 градусов предпробивной ток зависит от толщины образца. С увеличением толщины образца ток возрастает по абсолютной величине. При температурах выше 200 градусов имеется линейная зависимость предпробивного тока от энергии кристаллической решетки.

Электрическая прочность и термохимические характеристики диэлектриков

(А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, Е. К. Завадовская, В. Д. Кучин,
А. Ф. Калганов)

Электрическая прочность ионных кристаллов возрастает с увеличением энергии связи электронов, температуры плавления соединения, теплоты образования, энергии решетки. Электрическая прочность газообразных и жидких диэлектриков возрастает с увеличением сил связи между их молекулами.

Зависимость пробивного напряжения твердых диэлектриков от полярности электродов

(А. В. Астафуров, А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, В. Д. Кучин,
Е. К. Завадовская)

Разработана форма образца с конической лункой для испытания на пробой в неоднородном поле, при котором устраняются разряды в окружающей среде, а следовательно, и ее влияние на результат испытания.

Пробивное напряжение твердых диэлектриков, так же, как и газообразных, при положительном острие ниже, чем при отрицательном. Это явление наблюдалось для кристаллических диэлектриков и стекол при толщине слоя от нескольких десятых миллиметра до двадцати миллиметров.

Зависимость электрической прочности ионных кристаллов от температуры

(Г. А. Андреев, А. А. Воробьев, В. Д. Кучин)

Электрическая прочность ионных кристаллов при экспозиции от десятых долей микросекунды до нескольких секунд, в области низких температур, возрастает линейно с повышением температуры со скоростью порядка $1,75 \text{ кв/см град}$.

В области положительных температур выше $50\text{—}100^\circ\text{C}$ для кристаллов щелочно-галогидных солей наблюдается экспоненциальное понижение пробивного напряжения с температурой. В диапазоне температур от 20° до 440°C для кристаллов щелочно-галогидных солей более низкое пробивное напряжение имеют соединения с меньшей энергией решетки.

При экспозициях порядка сотой микросекунды электрическая прочность щелочно-галогидных кристаллов не зависит от температуры. При температурах выше $180\text{—}200^\circ\text{C}$ для щелочно-галогидных кристаллов пробивное напряжение экспоненциально уменьшается с повышением температуры, что удовлетворяет теории теплового пробоя В. А. Фока.

Пробивное напряжение кристаллов при пробое в неравномерном поле на импульсах обеих полярностей с длиной фронта несколько микросекунд не зависит от температуры.

При всех температурах и длительностях приложения напряжения электрическая прочность тем выше, чем больше энергия кристаллической решетки диэлектрика. Для области теплового пробоя ($200\text{—}450^\circ\text{C}$) существует линейная зависимость электрической прочности от энергии кристаллической решетки.

Участие электронов в пробое твердых диэлектриков

(А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, К. К. Сончик)

Разряды в частично окрашенных кристаллах каменной соли на импульсах идут преимущественно в части с большей концентрацией электронов. На импульсах при экспозиции порядка сотых долей микросекунды фотопроводимость и наличие центров окраски не влияют на электрическую прочность кристаллов.

С увеличением экспозиции в интервале от десятых микросекунды до постоянного напряжения, т. е. в пределах вольтвременной характеристики, где обнаруживается влияние объемных зарядов на электрическую прочность, наблюдается влияние центров окраски и фотопроводимости на пробой. Электрическая прочность окрашенных кристаллов ниже, чем неокрашенных.

Пробой при фотопроводимости сопровождается понижением прочности окрашенных кристаллов.

При пробое в неравномерном поле на импульсном напряжении и отрицательной полярности острия пробивное напряжение убывает при окраске кристаллов и фотопроводимости так, как и в однородном поле, но разница в пробивных значениях меньше, чем в однородном поле. На положительной полярности острия наблюдается небольшое увеличение пробивного напряжения для окрашенных образцов, пробитых в темноте.

Время запаздывания разряда в окрашенных кристаллах каменной

соли, пробитых при освещении, и неокрашенных при одинаковом значении напряженности электрического поля одинаковы.

Импульсная прочность твердых диэлектриков

(А. В. Астафуров, А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, В. Д. Кучин,
К. М. Кевролева, М. А. Мельников, К. К. Сончик, А. М. Трубицын,
А. М. Вендерович, Е. К. Завадовская)

Пробивное напряжение твердых диэлектриков понижается с увеличением числа действующих импульсов. Поэтому в ТПИ была разработана методика одноимпульсных испытаний на пробой на фронте волны напряжения и при воздействии волны с отвесным фронтом.

Вольтвременные характеристики различных твердых диэлектриков ионных монокристаллов, кристаллических органических материалов, стекла, парафина в широком диапазоне толщин от нескольких сотых миллиметров до 20 мм в однородных и неоднородных полях сохраняет одинаковый вид.

С уменьшением времени воздействия напряжения от нескольких секунд до сотысячных долей пробивное напряжение остается постоянным. Уменьшение экспозиции до десятых микросекунды при комнатной температуре сопровождается понижением пробивного напряжения. Дальнейшее уменьшение экспозиции сопровождается повышением пробивного напряжения, что является следствием запаздывания разряда.

Минимум в ходе зависимости пробивного напряжения от экспозиции уменьшается при понижении температуры. Для кристаллов щелочно-галогенидных соединений в области отрицательных температур минимум на вольтвременной характеристике отсутствует, что указывает на обусловленность минимума действием объемных зарядов.

Ионный объемный заряд повышает измеряемое значение электрической прочности диэлектриков, а электронный понижает.

Ионный объемный заряд в зависимости электрической прочности от времени воздействия напряжения при положительных температурах вызывает образование «ковша». При пробое кристаллических диэлектриков на импульсах с длиной фронта несколько микросекунд электрическая прочность на 15—25% ниже, чем при пробое на постоянном напряжении.

Для отоженных и неотоженных кристаллов общий вид вольтсекундной характеристики одинаков. Однако для отоженных монокристаллов увеличение электрической прочности наступает при экспозиции не порядка десятков микросекунд, а сотен микросекунд. В отоженных монокристаллах минимум вольтвременной характеристики смещается в сторону больших экспозиций.

Время формирования разряда в твердых диэлектриках, определяемое как время запаздывания разряда при условии, что отсутствует статистическое запаздывание, равно нескольким сотым микросекунды. Время формирования разряда в твердых диэлектриках возрастает с увеличением толщины. Средняя скорость развития разряда, определенная как отношение толщины слоя диэлектрика по пути пробоя ко времени формирования пробоя, имеет порядок десятков километров в секунду. Она меньше скорости разряда в газах на один — два порядка; скорость разряда возрастает с уменьшением энергии решетки.

При положительной полярности острейшая скорость развития разряда в твердых диэлектриках больше, чем при отрицательной в 3 — 6 раз.

С повышением температуры от минус сто градусов до 60—80 градусов, средняя скорость развития разряда в кристаллах растет. При температурах выше 60 — 80 градусов она понижается.

В диэлектриках толщиной слоя в десятки миллиметров средняя

скорость распространения разряда больше, чем в слоях толщиной в сотые доли миллиметра. Так же как и в газах, средняя скорость развития разряда в твердых диэлектриках возрастает с увеличением перенапряжения.

При положительном острие средняя скорость развития разряда в твердых диэлектриках больше в 3 — 6 раз, чем при отрицательном.

Влияние молекул кристаллизационной воды на физико-химические свойства кристаллогидратов

(К. А. Водопьянов, А. А. Воробьев, А. П. Изергин, К. М. Кевролева,
П. А. Савинцев, М. П. Тонконогов, Н. М. Торбин)

Молекулы кристаллизационной и конституционной воды, входя в решетку кристаллогидратов, увеличивают теплоту образования и парциальное давление.

Молекулы кристаллизационной воды уменьшают электрическую прочность, твердость по взаимному шлифованию кристаллов, коэффициент преломления, массовый коэффициент поглощения рентгеновских лучей и энергию кристаллической решетки соединения.

Электропроводность кристаллогидратов повышается при температуре дегидратации последних.

Ионные кристаллы, содержащие в своем составе полярные молекулы, имеют релаксационный характер диэлектрических потерь, обусловленный ориентацией полярных молекул.

Релаксационный механизм диэлектрических потерь в ионных полярных кристаллах (тальк, гипс, медный купорос и др.) проявляется в виде частотного и температурного максимумов угла диэлектрических потерь, которые смещаются в сторону высоких частот с увеличением температуры.

Температурно-частотные максимумы угла диэлектрических потерь кристаллогидратов обусловлены ориентацией полярных молекул кристаллизационной воды. Структура кристаллогидрата определяет количество температурных и частотных максимумов угла потерь, а их положение и величина определяется энергией активации и числом слабо связанных полярных молекул.

К теории электрического пробоя твердых диэлектриков

(А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская, В. Д. Кучин)

В момент пробоя подвижность электронов является минимальной, а их взаимодействие с решеткой максимальным. Энергия, накопленная электроном, затрачивается на разрушение кристаллической решетки, на преодоление взаимодействия ионов. Из условия пропорциональности между энергией электрона и энергией решетки и изменения подвижности электронов расчетом получена линейная зависимость между электрической прочностью кристалла и энергией решетки, удовлетворительно совпадающая с экспериментом.

Электрическая прочность однородных диэлектриков не зависит от механической нагрузки. Уплотнение диэлектрика при действии на него нагрузки сопровождается повышением его механической прочности, а нарушение сплошности диэлектрика — понижением электрической прочности.

Высокие электрические поля в диэлектриках, выдерживаемые при действии коротких импульсов, вызывают возникновение механических усилий, превосходящих их механическую прочность. Это привело к объяс-

нению пробоя на коротких импульсах, как механического разрушения диэлектриков.

Явление пробоя твердых диэлектриков представляется как сложный процесс. При высокой температуре и большой экспозиции развивается преимущественно тепловое разрушение диэлектрика. Ионизационные процессы, осложненные действием объемных зарядов и приводящие к разрушению диэлектрика, обуславливают третий способ пробоя твердых диэлектриков. Каждый из указанных трех способов разрушения диэлектриков в электрическом поле не противопоставляется один другому и действует в некоторой области температур и экспозиций.

Систематизация свойств ионных кристаллов

(А. А. Воробьев)

Свойства ионных кристаллов связаны с энергией кристаллической решетки и изменяются так, как это представлено в таблице.

Свойства ионных кристаллов и энергия кристаллической решетки.

С увеличением энергии решетки бинарных соединений гомологического ряда	
увеличивается	уменьшается
1. Температура плавления.	1. Электропроводность.
2. Твердость.	2. Диэлектрические потери.
3. Плотность.	3. Коэффициент теплового расширения.
4. Модуль всестороннего сжатия, модуль упругости, модуль сдвига, давление истечения, коэффициент Пуассона.	4. Гигроскопичность.
5. Поверхностная энергия.	5. Поляризация.
6. Механическая прочность.	6. Диэлектрическая проницаемость.
7. Теплоты диссоциации, сублимации, гидратации, растворения, плавления, образования, теплопроводность.	7. Теплоемкость.
8. Квант энергии собственного поглощения в инфракрасной, видимой, ультрафиолетовой части спектра.	8. Коэффициент преломления света.
9. Число ионов в единице объема.	9. Коэффициент поглощения рентгеновских лучей.
10. Электрическая прочность при электрическом и тепловом пробое.	10. Частота собственных колебаний ионов решетки.
11. Ширина F-полосы.	11. Энтропия.
12. Характеристическая температура.	
13. Энергия активации.	

Таблица дает указания направлений поисков ионных диэлектриков с необходимыми физическими свойствами.

Свойства диэлектриков и молекулярная концентрация

(П. А. Савинцев)

Физико-химические свойства ионных кристаллов сопоставлены с молекулярной концентрацией, определенной как отношение плотности кристалла к молекулярному весу. С увеличением молекулярной концентрации возрастают твердость по Бринелю, царапанию, взаимному шлифованию, затухающим колебаниям, сверлению, модули упругости, давление истечения, температура плавления и кипения, теплота образования твердого соединения, теплота плавления и сублимации, дебаевская температура, уменьшается коэффициент линейного расширения, теплоемкость, электропроводность, диэлектрические потери, коэффициент преломления света.

Эти результаты позволяют рассматривать молекулярную концентрацию как физическую величину, характеризующую связь между частицами решетки. Молекулярная концентрация увеличивается с возрастанием энергии решетки.

Свойства диэлектрических сплавов

(В. Е. Аверичева, К. А. Водопьянов, А. А. Воробьев, А. Ф. Городецкий, Е. К. Завадовская, М. С. Иванкина, А. Н. Кислина, М. А. Кривов, Г. И. Потахова, П. А. Савинцев, Д. Д. Саратовкин, А. М. Трубицын)

Положение акад. Н. С. Курнакова о соответствии между механическими свойствами и теплотой образования распространено на электрические свойства твердых растворов. Показано, что с увеличением теплоты образования монокристаллов твердых растворов уменьшается их устойчивость, твердость, электрическая прочность; растут диэлектрические потери, электропроводность и др.

Электропроводность, электрическая прочность и диэлектрические потери на высокой частоте в монокристаллах твердых бинарных растворов щелочно-галогидных солей зависят от состава. В области равного содержания компонент и наибольшего нарушения решетки наблюдается максимум потерь, максимум теплоты образования и коэффициента линейного расширения, электропроводности, минимум твердости по взаимному шлифованию и электрической прочности.

Монокристаллы твердых растворов после их выращивания имеют значительную дефектность и число ионов в элементарной решетке меньше восьми. Со временем хранения при нормализации дефектность монокристаллов уменьшается, число ионов в элементарной решетке приближается к восьми. При нормализации монокристаллов и улучшении их структуры возрастает микротвердость, электрическая прочность, уменьшается электропроводность, теплота образования, коэффициент линейного расширения и др.

Сопоставление физических свойств твердых растворов щелочно-галогидных солей с молекулярной концентрацией показывает, что с увеличением молекулярной концентрации возрастают электрическая прочность, температура плавления твердых растворов, дебаевская температура, относительная твердость по взаимному шлифованию и сверлению, а теплота образования, коэффициент линейного расширения, электропроводность, микротвердость, твердость по Бринелю уменьшаются.

Обнаружено и изучено новое физическое явление — понижение температуры плавления в месте контакта кристаллов, могущих образовывать эвтектики и твердые растворы с понижающейся линией ликвидуса. В контакте разнородных щелочно-галогидных кристаллов температура плавления понижается на десятки и сотни градусов по сравнению с температурой плавления соприкасающихся кристаллов. Показано, что низкотемпературность эвтектики не является свойством их особой структуры и определенного химического состава.

Исследования диэлектрических потерь в полях высокой частоты

О механизме диэлектрических потерь в ионных неполярных кристаллах

(К. А. Водопьянов, А. А. Воробьев и Г. И. Потахова)

Диэлектрики с более совершенной структурой и большей энергией связи между структурными элементами так же, как и чистые жидкости, не имеющие в своем составе полярных молекул, имеют меньшие диэлектрические потери.

Измерение угла диэлектрических потерь в щёлочно-галогидных кристаллах на высокой частоте (10^5 — 10^8 гц) показало, что при одинаковых температуре и частоте угол потерь возрастает с увеличением постоянной кристаллической решетки, уменьшается с повышением температуры плавления, теплоты образования, теплоты сублимации, молекулярного веса кристалла.

Механизм диэлектрических потерь в ионных кристаллах представляется следующим образом. Под влиянием внешнего воздействия (электрического, теплового и др.) в кристалле происходит увеличение числа слабо связанных ионов, имеющих различную энергию активации. Небольшое число ионов, обладающих большой энергией активации, под влиянием электрического поля в кристалле совершает поступательное движение, создавая сквозной ток проводимости. Большая часть ионов, имеющих меньшую энергию активации, под действием переменного электрического поля будет совершать возвратно-поступательное перемещение в ограниченном объеме, обуславливая диэлектрические потери релаксационного характера. Чем меньше энергия решетки кристалла, тем больше будет слабо связанных ионов, обуславливающих диэлектрические потери в нем. Поэтому угол диэлектрических потерь является характеристикой кристаллов наряду с другими его физико-химическими характеристиками.

Диэлектрические потери в неорганических стеклах

(К. А. Водопьянов, Р. М. Кессених, М. А. Кривов, В. А. Преснов, А. А. Харьков)

В чистых силикатных и борных стеклах диэлектрические потери обусловлены колебаниями структурных элементов с малой амплитудой, не зависящей от изменения температуры (20 — 320° С) и частоты электрического поля (10^5 — 10^8 гц).

Для двухкомпонентных стекол характерным является увеличение угла потерь с ростом концентрации примесного иона. Причем одновалентные ионы вызывают более заметный рост угла потерь, чем двухвалентные. При малых концентрациях примеси угол потерь не зависит от частоты. Анализ температурно-частотной зависимости угла потерь показывает, что диэлектрические потери обусловлены релаксационным смещением примесных ионов.

В случае больших концентраций примесей до 30% в двухкомпонентных силикатных и борных стеклах проявляются омические диэлектрические потери.

Экспериментально доказано, что диэлектрические потери в простых стеклах, так же, как и в щелочно-галогидных кристаллах, обуславливаются химическим составом и прочностью химического соединения.

При исследовании трехкомпонентных силикатных и борных стекол было найдено, что существует функциональная зависимость между углом потерь и энергией диссоциации ионов, на основании которой можно определять концентрацию ионов примеси, соответствующих минимуму угла диэлектрических потерь. Показано, что диэлектрические потери в тройных стеклах отличны от омических и связаны с процессами релаксационного характера.

Найденные закономерности в характеристике диэлектрических потерь в простых стеклах дали возможность связать физико-химические свойства многокомпонентных стекол с их диэлектрическими потерями. Это дало возможность готовить новые сорта стекол, обладающие высокими диэлектрическими свойствами.

Диэлектрические потери в стеатитовых керамических материалах

(В. М. Белоусов, К. А. Водопьянов, А. П. Вяткин, М. А. Кривов)

При исследовании диэлектрических свойств стеатитовых керамических материалов в зависимости от температуры их обжига и газовой среды получены закономерности для температурно-частотного хода угла диэлектрических потерь, характерные для релаксационного механизма диэлектрических потерь. Установлено, что для получения высококачественного изоляционного материала необходимы соответствующий состав компонент и условия изготовления, чтобы в результате окончательного обжига происходило хорошее спекание черенка, который имеет в основном кристаллическую фазу. Как в кристаллической, так и в аморфной фазе, должны быть структурные элементы с большой энергией активации, не дающие диэлектрических потерь релаксационного характера.

Диэлектрические свойства слюды восточно-сибирских месторождений

(К. А. Водопьянов, И. Г. Ворожцова, А. П. Изергин)

Природа диэлектрических потерь слюды мусковита в области высоких частот отлична от омических потерь в том случае, когда электрическое поле перпендикулярно плоскости спайности. В зависимости от частоты и температуры у пятнистой слюды могут проявляться диэлектрические потери омического и релаксационного характера.

Омический характер диэлектрических потерь в пятнистой слюде проявляется в случае действия электрического поля параллельно плоскости спайности.

Угол диэлектрических потерь слюды мусковита зависит от вида и концентрации минералогических включений и кристаллизационной воды. Прокаливание пятнистого мусковита при 600°C , когда начинает удаляться кристаллизационная вода из самой слюды, приводит к появлению температурного максимума угла потерь. Появление максимума угла потерь связано с ослаблением связей полярных молекул кристаллизационной воды в решетке мусковита в результате термического воздействия и появления возможности их ориентации под действием электрического поля.

Угол диэлектрических потерь для слюды флогопита определяется количественным содержанием кристаллизационной воды, имеет максимум в области звуковых частот. В интервале температур $15\text{--}200^{\circ}\text{C}$ угол потерь имеет максимум. С повышением частоты максимум угла потерь смещается в сторону высоких температур.

Диэлектрические потери слюды флогопита объяснены на основании представлений о возможности ориентации полярных молекул кристаллизационной воды.

Исследование диэлектрических свойств слюды мусковита и флогопита дали практические рекомендации о рациональном использовании ресурсов слюды и расширении области применения низкосортной слюды.

Работы по кристаллизации ионных диэлектриков

(М. А. Большанина, Е. П. Волочнева, К. М. Кевролева, А. М. Кузьмий, М. В. Максимов, И. Я. Мелик-Гайказян, Д. Д. Саратовкин, П. С. Сасим, С. А. Строительев).

Изучение механизма кристаллизации показало:

а) Увеличение числа центров кристаллизации при действии на раствор радиоактивного излучения.

б) Независимость скорости роста кристаллов калиевых квасцов от вязкости раствора. Это доказывает, что рост кристалла обусловлен явлением диффузии, а не конвекцией.

в) Скорость растворения кристаллов каменной соли одинакова для всех граней, в то время как скорость роста различна.

Изучено влияние сорастворенных примесей на кристаллизацию из водных растворов хлористых аммония и натрия, иодистого калия и калиевых квасцов. Показано, что для изменения формы кристаллов требуется не только присутствие примесей, но и их химическое воздействие на кристаллизующееся вещество.

Работы обобщены в монографии «Физика твердого тела», т. 1, 1937 г. изд., расширенной и переизданной в 1954 г. под названием «Кристаллы и кристаллизация».

Изучение дендритных и скелетных форм кристаллов на кафедре физики ТПИ показало, что примеси, химически взаимодействующие с кристаллизующимся веществом, изменяют огранку дендритов и время распада дендритов.

Работы по изучению дендритных форм обобщены в монографии «Дендритная кристаллизация, 1953 и 1957 гг. изд.».

На кафедре кристаллографии и минералогии ТПИ на примере кристаллизации из водных растворов сернокислых магния и натрия в присутствии различных добавок найден критерий для установления эффективных примесей, облегчающих выращивание технически ценных кристаллов. Таким критерием является признак изменения растворимости. Показано, что сорастворенные вещества, повышающие растворимость главной соли раствора, приводят к устранению дефектов в сложных кристаллах.

Планетарным методом выращиваются плотные, правильной огранки кристаллы сернокислых магния, натрия, меди и кристаллы хлористого, бромистого и иодистого калия. Показано, что критерий растворимости позволяет подобрать примеси, облегчающие рост этих кристаллов.

Механические свойства ионных диэлектриков

(К. А. Амброз, А. Е. Абрамович, М. А. Большанина, Н. А. Большанина, Н. А. Бессонов, А. А. Воробьев, А. А. Воробьева, Ю. А. Грдина, В. Я. Зленко, В. Д. Кузнецов, Н. Ф. Кунин, В. П. Куцепаленко, А. Н. Кислина, В. М. Кудрявцева, А. А. Курбатов, Е. В. Лаврентьева, А. Ф. Наумов, В. В. Поздняков, Н. Д. Попов, К. В. Савицкий, Н. А. Семенцов, П. А. Савинцев, А. М. Трубицын).

Механические свойства ионных кристаллов наиболее полно изучены на кристаллах каменной соли. Установлено, что при первом измерении значения модуля Юнга каменной соли колеблются в довольно широких пределах. После нескольких последовательных упрочнений, посредством релаксации или течения материала, значения модуля Юнга до предела пропорциональности становятся постоянными, и, начиная с этого предела, постепенно убывают. С увеличением модуля Юнга кристаллов возрастают предел текучести и предел прочности каменной соли.

Оптический предел текучести каменной соли имеет вполне определенное значение после отжига кристалла. Уменьшение времени отжига сопровождается понижением предела текучести.

Для определения твердости хрупких тел предложены методы сверления, затухающих колебаний, взаимного шлифования, абразивного шлифования и усовершенствован способ раскалывания.

Найдено, что кристаллы, выращенные из растворов, обладают меньшей твердостью, чем кристаллы, выращенные из расплава.

По методу шлифования получено, что твердость различных граней кристалла каменной соли различна. Наибольшей твердостью обладает грань октаэдра и наименьшей — грань куба.

Сила трения при шлифовании по разным граням кристалла не изменяется, если остается постоянной прижимающая сила и площадь износа.

Частицы порошков, получающихся при шлифовании различных граней каменной соли при одинаковых условиях, имеют одинаковые линейные размеры.

Количество теплоты, выделяющейся при шлифовании различных граней каменной соли при одинаковых условиях, не зависит от наименования грани.

При определении твердости по способу царапания грани куба каменной соли получены розетки твердости, изображающие зависимость твердости от направления движения царапающего острия. Твердость имеет наибольшее значение при движении острия параллельно ребру куба и наименьшее — при движении под углом 45° к ребру куба.

Найдено, что при царапании только небольшая часть работы расходуется на раздробление кристалла каменной соли, т. е. на увеличение поверхностной энергии, большая часть работы затрачивается на упругие и пластические деформации, на трение и переходит в теплоту.

Твердость по Бринелю уменьшается при нагревании каменной соли. Зависимость имеет линейный вид в пределах температур от комнатной до 400° , в случае статического способа нагружения образца. При динамическом нагружении каменной соли твердость по Бринелю убывает с температурой нелинейно.

Каменная соль, окрашенная в парах натрия и лучами Рентгена, имеет повышенный предел пропорциональности и текучести; модуль Юнга при этом изменяется мало.

Твердость по способу сверления и взаимного шлифования поликристаллов твердых растворов щелочно-галогидных солей изменяется в зависимости от состава по кривым с максимумом в области средних концентраций.

Твердость по взаимному шлифованию и сверлению монокристаллов твердых растворов щелочно-галогидных солей изменяется в зависимости от состава по кривым с минимумом в области средних концентраций.

В эвтектических системах щелочно-галогидных солей наименьшая твердость по взаимному шлифованию приходится на эвтектические составы.

Связь с производством томских ученых, занимающихся диэлектриками и изоляцией, была разносторонней. Она включала в основном научную разработку проблем диэлектриков, интересующих предприятия и другие научные учреждения Москвы, Ленинграда, Харькова, Новосибирска, Иркутска, Норильска, Саратова, Кемерово, Сталинска и др.; экспертизы и консультации, лекции на предприятиях, подготовку кадров, бригады помощи предприятиям, публикацию работ ученых и др.

Некоторые примеры связи с производством приводятся ниже.

Свойства изолирующих материалов при низких температурах

(З. Ф. Божко, Н. Б. Богданова, А. А. Воробьев, В. А. Воробьев, Н. И. Воробьев, В. С. Дмитриевский, К. А. Дуков, Е. К. Завадовская, А. К. Красин, Р. М. Кессених, Н. А. Приходько, Н. А. Снегирев, А. М. Трубицын, М. Н. Трескина)

Плотность трансформаторных масел с понижением температуры увеличивается линейно. Вязкость масел с понижением температуры возрастает экспоненциально. Установлено, что в некоторых сортах масел при

низких температурах происходит образование структуры, приводящее к значительному увеличению вязкости масел. Перемешивание масла сопровождается разрушением структуры и уменьшением вязкости масла.

При переходе через нуль градусов и вымерзании растворенной воды электрическая прочность масла возрастает скачком. Дальнейшее понижение температуры сопровождается повышением электрической прочности масла. Возрастает также электрическая прочность бумажных материалов, пропитанных маслом, и напряжение поверхностных разрядов. Электрическая прочность заливочных масс с понижением температуры возрастает. В области температуры растрескивания электрическая прочность заливочных масс уменьшается скачком.

Электрическая прочность фарфора при низких температурах до 90—150° сохраняется постоянной.

Электропроводность масла, бумажной изоляции, лакоткани и некоторых других технических диэлектриков с понижением температуры ниже нуля уменьшается по обычному экспоненциальному закону.

Исследование диэлектрических потерь вакуумплотной керамики (типа ВК-92) показало, что угол потерь при частоте 1 *мгц* не изменяется в температурном интервале (+20) ÷ (—70°C).

Электрическая прочность полиэтилена при понижении температуры от +80° до —100°C повышается от 140 до 260 *кв/мм*. Меньшая температурная зависимость наблюдается у полистирола. Фторопласт 4 почти не повышает своей прочности при понижении температуры. Повышение электрической прочности полиэтилена и полистирола с понижением температуры совпадает с данными Оукса.

Исследование диэлектрических потерь и проницаемости термореактивных компаундов на частоте 1 *кц* в температурном интервале —60 ÷ +120°C обнаружило, что в области температур +20 ÷ 40°C имеется дипольный максимум угла потерь. Диэлектрическая проницаемость изменяется с температурой по кривой, характерной для дипольных диэлектриков.

Улучшение свойств трансформаторных масел при добавлении кумароновых смол

(А. А. Воробьев, Н. П. Приходько)

Растворение в изоляционных маслах небольшого количества кумароновых смол улучшает их стабильность в эксплуатации и хранении, предупреждает образование структурной вязкости при низкой температуре, понижает гигроскопичность и улучшает многие другие эксплуатационные свойства масел.

Распределение напряжения по изоляции

(В. С. Дмитриевский)

Разработан метод измерения распределения напряжения по поверхности изоляции, погруженной в жидкость. Погрешность измерения не превышает 10 ÷ 15 процентов измеряемой величины.

С возрастанием диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика распределение напряжения на импульсах становится более равномерным.

Напряженность поля у электродов прямо пропорциональна приложенному напряжению вплоть до напряжения появления поверхностных разрядов.

Работа электроаппаратуры и изоляции машин при низких температурах

(А. А. Воробьев, Н. И. Воробьев, Е. К. Завадовская, А. К. Красин, В. П. Силинский).

Исследование теплового режима высоковольтных трансформаторов с застывшим маслом при температуре — 50°C и включении их под нагрузку нормальную и нагрузку в 160 % показало отсутствие опасного перегрева, т. к. разогревающееся масло быстро начинает выполнять свои функции теплоотвода.

Возрастание вязкости масел с понижением температуры сопровождается увеличением времени движения штанги масляного выключателя. При большой вязкости масла время движения штанги выключателя становится неопределенным и возможна остановка ее движения. В масляных выключателях, предназначенных для работы при низких температурах, необходимо применять специальные маловязкие масла или применять их подогрев.

Исследование морозостойкости изоляции двигателей единой серии показало достаточную морозостойкость изоляции. Морозостойкость изоляции двигателей нормального исполнения оказалась выше, чем у двигателей влагостойкого исполнения.

Электропроводность лаковых покрытий

Проведены измерения электропроводности лаковых покрытий трубчатых разрядников, находящихся на открытом воздухе в условиях сибирской зимы при понижении температуры до — 40°C.

Прочность фарфора на сжатие, определяемая на кубиках с линейными размерами 10 мм, не имеет закономерной связи с пористостью, измеряемой под микроскопом.

Профилактические испытания высоковольтной изоляции в Кузбассе

(Н. Д. Булатов, А. А. Воробьев, Н. А. Приходько, Р. М. Шевчук)

В продолжение нескольких лет перед войной бригады сотрудников СФТИ производили плановые профилактические испытания высоковольтной изоляции на предприятиях Кузбасса и Томской дороги, в связи с чем были разработаны новые приборы и методы измерения, например, определение дефектных высоковольтных изоляторов в эксплуатации по радиопомехам, штанга для промера распределения падения напряжения по изолятору или гирлянде и др.

Профилактические испытания позволяли своевременно выявить ослабленные участки изоляции и предупредить аварию. Томские ученые способствовали организации службы защиты от перенапряжений и контроля изоляции в Кузбассе.

Изучение старения высоковольтных фарфоровых изоляторов и анализ аварий с изоляторами в эксплуатации

(А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская, Н. Н. Ончуков, В. Н. Титов).

Установлено, что в изоляторах, находящихся в работе, со временем развиваются микронарушения. Чем больше нагрузка, приходящаяся на изолятор, тем больше пористость фарфора. С увеличением пористости фарфора возрастают диэлектрические потери на высоком напряжении и понижается импульсная электрическая прочность изолятора.

Зависимость электрической прочности фарфора от его пористости.

Для определения пористости фарфора изоляторов была введена условная характеристика: длина, занимаемая порами на протяжении 1 мм на шлифе.

Сопоставляя величину импульсных пробивных напряжений изоляторов с величиной их закрытой пористости, обнаружили, что с увеличением закрытой пористости в изоляторах резко уменьшается их импульсное пробивное напряжение.

Систематической зависимости между пробивным напряжением и пористостью при испытании фарфора в образцах от 0,5 до 2 мм не получено, т. к. попадавшие поры больших размеров значительно снижали пробивное напряжение таких ослабленных образцов.

Прочность фарфора на сжатие

Прочность фарфоровых кубиков на сжатие изменялась в пределах от 4100 до 5000 кг/см^2 , а длина пор по шлифу при этом изменялась от 127 до 200 микрон на миллиметр, причем высоким значениям механической прочности соответствовали как малые, так и большие значения пористости.

Применение импульсного разряда для разрушения горных пород, обработки материалов и бурения скважин

(А. В. Астафуров, А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская, И. И. Каляцкий).

В конце сороковых годов были поставлены опыты по дроблению угля и горных пород мощными электрическими импульсами высокого напряжения, которые подтвердили экономическую целесообразность (высокий к. п. д.) и техническую возможность отбоя угля в открытых забоях с помощью мощных искровых импульсных разрядов. Найдено, что для целей разрушения лучше всего применять импульсы порядка микросекунды, при которых пробивное напряжение диэлектриков на положительной полярности является наименьшим. Степень дробления отбиваемой породы или угля возрастает с увеличением энергии импульса в разряде и др.

Способы борьбы с гололедом проводов и тросов

(Н. Б. Богданова, А. А. Воробьев и Д. Д. Саратовкин)

1. Разрушение гололеда с помощью механических колебаний провода при вибрации.

2. Физико-химический способ перевода льда в механически непрочное состояние, когда корка льда может отвалиться под собственной тяжестью. Это достигается путем покрытия проводов смазкой, содержащей вещества, понижающие температуру замерзания воды.

3. Предупреждение гололеда на проводах при их коронировании, когда капли влаги или кристаллики, зарядившись в чехле короны, отталкиваются от провода и при некоторых условиях совсем не смогут осесть на его поверхности.

Заключение

Томские ученые занимались исследованием актуальных проблем в области физики диэлектриков и изолирующих материалов, а также практики их эксплуатации.

Производилось разностороннее и комплексное изучение физических свойств диэлектриков. Макроскопическое и микроскопическое исследование явлений при пробое твердых диэлектриков, электропроводности, ди-

электрических потерь и др. увеличило научные сведения о физических процессах в изоляции и способствовало разработке практически интересных изолирующих материалов.

В трудах томских исследователей получила фактическое обоснование систематизация свойств диэлектриков на основе представления о силах взаимодействия между структурными элементами. Научное направление о связи между свойствами диэлектриков, их составом и структурой, которым руководствовались томские ученые, находит последователей в СССР и за границей.
