

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОННЫХ КРИСТАЛЛАХ, ТРЕБУЮЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОБОБЩЕНИЯ

А. А. Воробьев

Физические свойства ионных кристаллов определяются энергией решетки и внешними условиями. Энергия решетки соединений увеличивается пропорционально произведению валентностей ионов и обратно пропорционально сумме ионных радиусов. Соответственно периодическо-

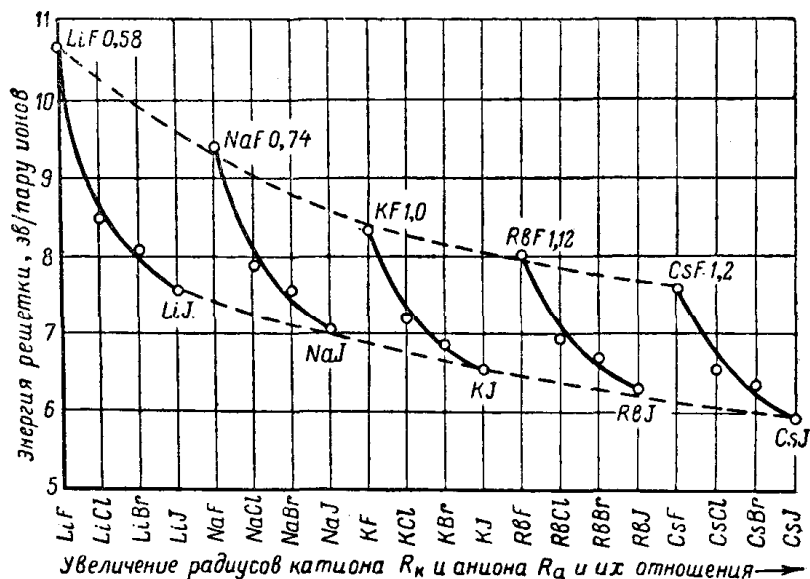


Рис. 1. Изменение энергии решетки для кристаллов щелочно-галогенных солей в зависимости от химического состава.

му изменению свойств химических элементов в таблице Менделеева периодически изменяется и энергия кристаллической решетки химических соединений.

На рис. 1 представлены изменения энергии решетки для кристаллов щелочногалогенных солей с составом.

Соединения расположены в порядке увеличения радиусов анионов и катионов и возрастания отношения радиуса катиона к радиусу аниона. Увеличение размеров элементарной решетки с возрастанием ионных радиусов сопровождается уменьшением энергии решетки, происходящим периодически. Замещение аниона при постоянном катионе или замещение катиона при постоянном анионе сопровождаются монотонным изменением энергии решетки. Переход же к галогенным соединениям другого металла или соединения металлов с другим галогеном сопровождается переходом на другую кривую.

Энергия связи между соседними ионами в кристаллической решетке должна проявляться в физических процессах, связанных со смещением из положения равновесия или освобождением электрических зарядов. Чем больше связи между соседними ионами, тем труднее будут смещаться:

или освобождаться частицы из положения равновесия, тем большую энергию нужно затрачивать для того, чтобы вызвать физический процесс или явление.

С увеличением энергии решетки повышается устойчивость соединения, возрастают твердость монокристаллов (рис. 2), температура плавления (рис. 3), электрическая прочность (рис. 4), уменьшаются электро-

проводность (рис. 5), диэлектрические потери, закономерно изменяются и другие характеристики кристаллов.

Исследования показали, что энергия, необходимая для совершения электронных процессов в ионных кристаллах, зависит от величины энергии решетки, и, следовательно, закономерно изменяется с химическим составом соединения.

Возрастание энергии решетки для кристаллов соединений металлов первой и второй групп связано с уменьшением

электронной поляризуемости (рис. 6), электронной составляющей диэлектрической проницаемости и показателя преломления (рис. 7 и 8). В кристаллах щелочногалогидных солей с увеличением энергии решетки собственное поглощение в ультрафиолетовой части спектра и максимум полосы поглощения смещаются в сторону более коротких длин волн. По измерениям А. Д. Щелокова [1], с увеличением энергии решетки уменьшаются поглощение рентгеновых лучей (рис. 9) и люминесценция кристаллов щелочногалогидных солей, вызываемая ими.

Такие же закономерности наблюдаются и на образцах, прессованных из порошков.

Поглощение рентгеновых лучей в основном определяется числом z электронов в атоме. Поглощение рентгеновых лучей в молекуле щелочногалогидных соединений определяется некоторым эффективным числом электронов, которое связано с энергией решетки.

Кристаллическая решетка как целое, ее энергетическое состояние, связи и взаимодействия, существующие в ней, имеют важное и решающее значение для любых электронных, в том числе и оптических процессов в кристалле. Решетка как система, возмущающая центры свечения, выступает в процессах люминесценции и температурного свечения кристаллов. В этой связи интересно отметить наличие колебательной структуры, обнаруженной некоторыми исследователями в спектрах люми-

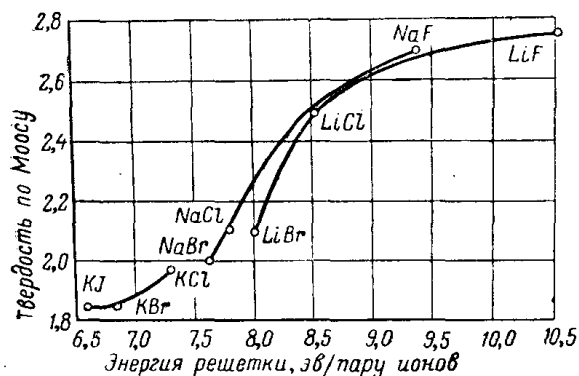


Рис. 2. Зависимость твердости монокристаллов от энергии их решетки.

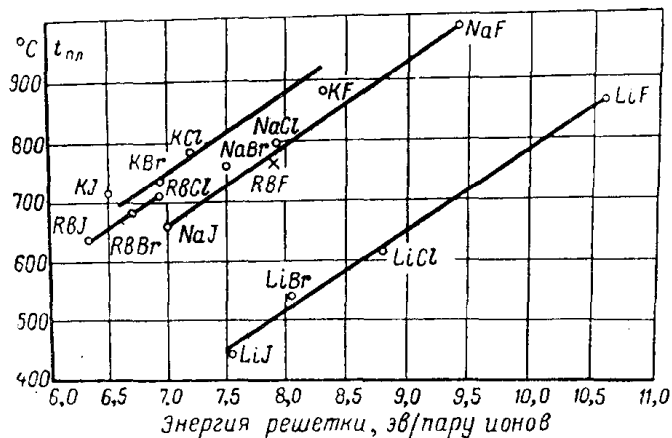


Рис. 3. Зависимость температуры плавления ионных кристаллов от энергии решетки.

несценции кристаллических веществ и указывающей на существование непосредственного взаимодействия между колебаниями решетки и электронными переходами, ответственными за люминесценцию. Так, П. С. Литвиновой [2] была установлена подобная структура в спектрах фотолюминесценции окиси цинка (ZnO).

В. А. Соколовым [3] недавно обнаружена четко выраженная колебательная структура в спектрах температурного свечения, или так называе-

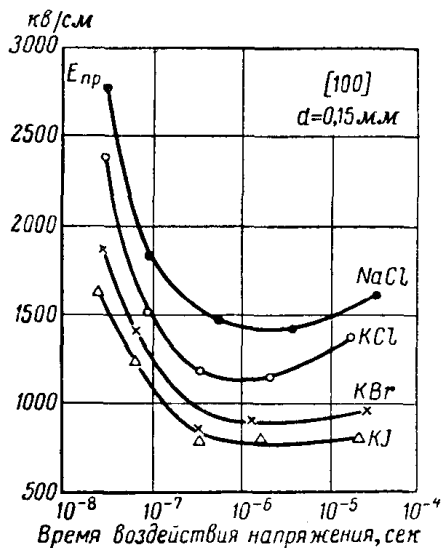


Рис. 4. Зависимость между электрической прочностью от энергии решетки.

мой «кандолуминесценции», окиси магния и окиси алюминия, что свидетельствует о наличии тесного взаимодействия между колебаниями решетки и оптическими электронными переходами также и в данных случаях.

Значительный интерес представляют экспериментальные и теоретические закономерности подвижности электронов в диэлектриках и полупроводниках. Существует удовлетворительная теория температурной зависимости подвижности электронов в полупроводниках и диэлектриках, теория, хорошо совпадающая с экспериментальными результатами.

Имеющиеся экспериментальные данные по подвижности электронов в диэлектриках немногочисленны [4]. Известны опыты В. И. Пружининой-Грановской [5] по измерению сопротивления слюды в магнитном поле и П. Е. Саржевского [6] по исследованию кварца в сильных электрических полях. По данным этих авторов подвижность электронов не остается постоянной в высоких полях, а при некоторых условиях уменьшается с ростом напряженности поля по закону $u \sim \frac{1}{E}$ и $u \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$ (рис. 10).

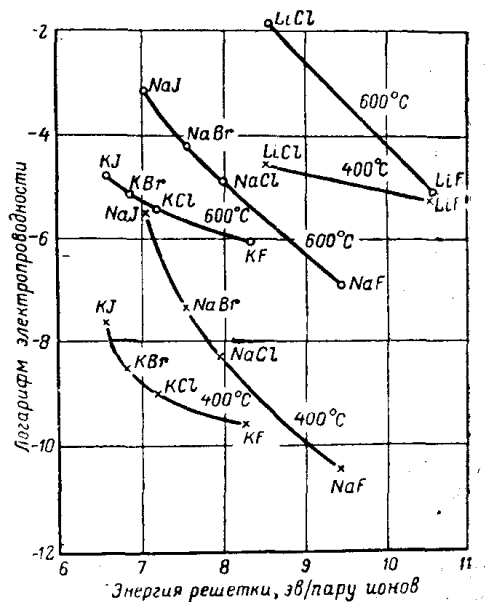


Рис. 5. Зависимость между электропроводностью (σ ом⁻¹.см⁻¹) щелочногалогидных кристаллов при температурах 400 (×), 600 (○)°C от энергии решетки.

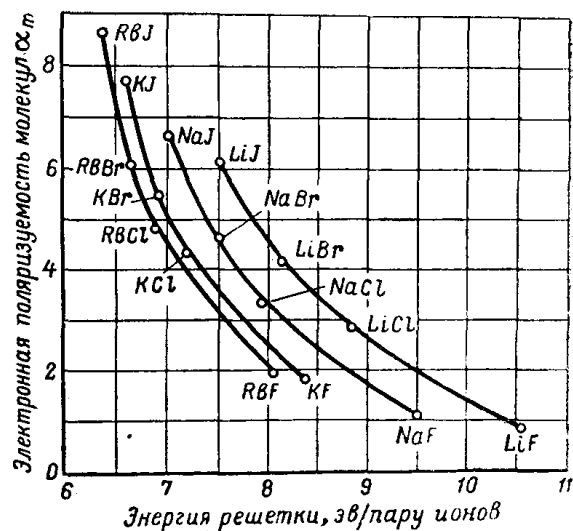


Рис. 6. Зависимость электронной поляризуемости от энергии решетки при $\lambda = 5893 \text{ Å}$.

Для диэлектриков в сильных полях имеет место отступление от закона Ома. Оно выражается в постоянстве тока при изменении напряженности поля.

Н. П. Калабухов [7] наблюдал ток насыщения при фотопроводимости рентгенизованной NaCl. В его опытах постоянное значение фототока

наступило при напряженности поля $\sim 10^3$ в/см и следовало за областью, в которой выполняется закон Ома.

Н. П. Калабухов объясняет ток насыщения тем, что вероятность захвата электронов атомами зависит от скорости движения электронов. В области тока насыщения электроны, по-видимому, достигают той скорости, при которой вероятность их захвата атомами будет наибольшая. В этой области напряженности поля рассеяние электронов увеличивается, число их в общем потоке в направлении поля уменьшается и

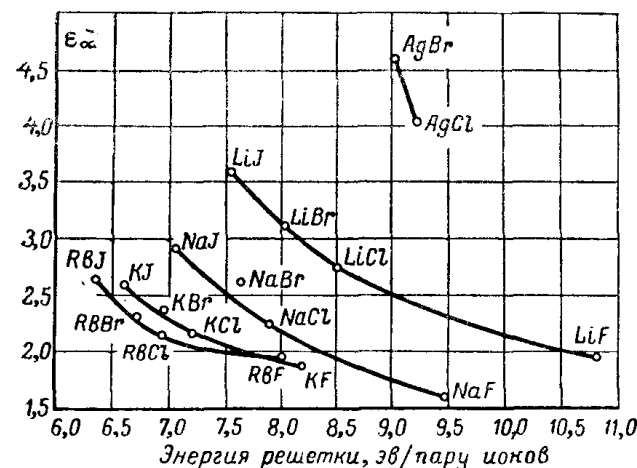


Рис. 7. Зависимость электронной составляющей диэлектрической проницаемости и показателя преломления кристаллов щелочногалогидных солей от энергии решетки.

плотность тока сохраняет постоянное значение. Н. П. Калабухов наблюдал также ток насыщения при фотопроводимости окрашенных кристаллов KCl и KJ.

Следует добавить к объяснению тока насыщения в диэлектриках, приведенному Н. П. Калабуховым, что с ростом напряженности поля

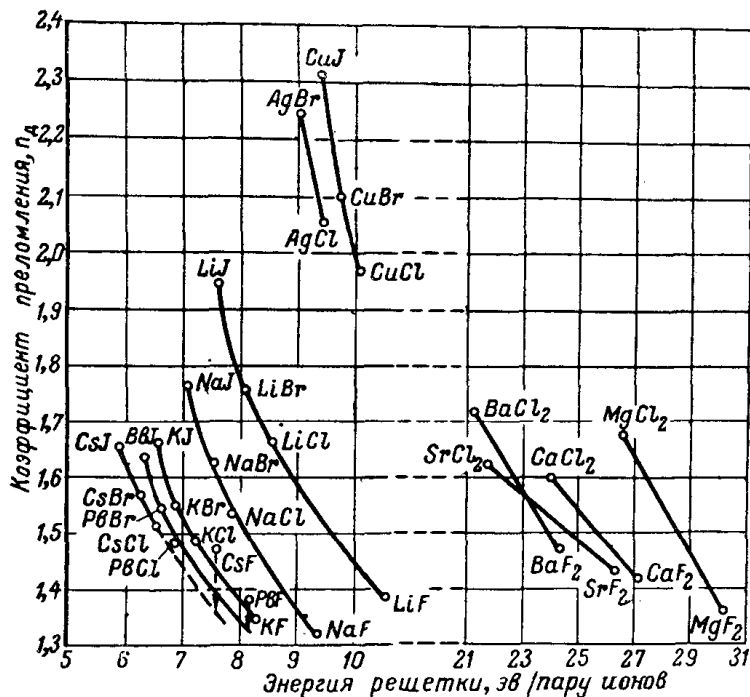


Рис. 8. Зависимость показателя преломления кристаллов щелочногалогидных солей от энергии решетки при $\lambda_D = 5893 \text{ \AA}$
 — структура решетки типа NaCl; - - - структура решетки типа CsCl.

может изменяться не только концентрация электронов, но и подвижность электронов и что изменение подвижности электронов с напряженностью поля может оказаться более существенным в явлении тока насыщения.

Электрон при упругих столкновениях может передавать часть кинетической энергии ловушкам или узлам решетки, равную $\frac{2m}{M} W_k$. С увеличением скорости движения электрона величина передаваемой энергии увеличивается. Если скорость электронов принимает постоянное значение в каком-то интервале напряженности поля, то, следовательно, подвижность электронов должна изменяться обратно пропорционально напряженности поля.

А. Хиппель [8] (рис. 11) наблюдал насыщение фототока в окрашенных кристаллах KCl. Ток насыщения устанавливался при напряженности поля 600 кВ/см. Наблюдение было проведено до напряженности поля

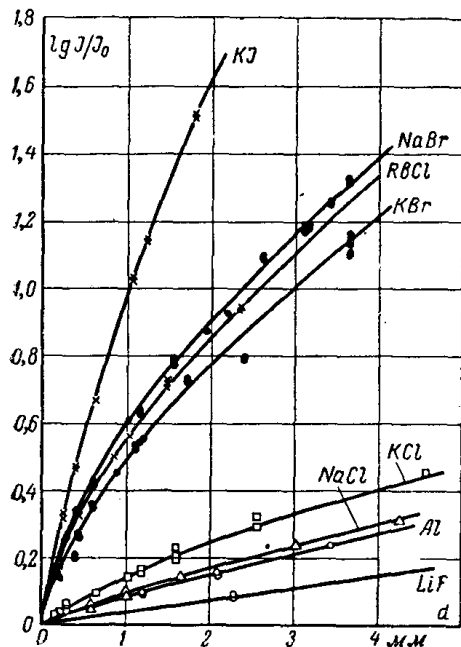


Рис. 9. Зависимость поглощения рентгеновых лучей кристаллов щелочно-галогенных солей от энергии решетки. 100 кВ, фильтр 1 мм Al, $\Delta = 3,35$ мм Al, $h = 1,59$, $\lambda_{эф} = 0,34$ Å.

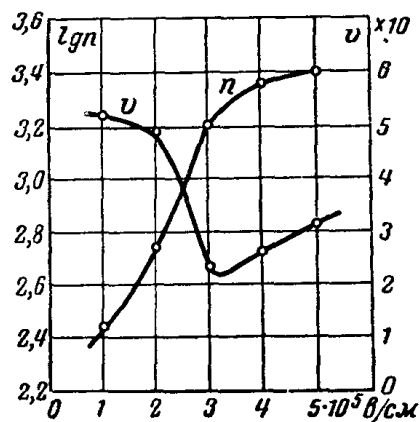


Рис. 10. Зависимость подвижности v и числа электронов n в высоких полях от напряженности поля. Температура 355° С.

900 кВ/см. При 920 кВ/см произошел пробой образца. Измерение тока производилось при постоянной освещенности образца, а следовательно, и неизменной концентрации электронов в образце.

Таким образом, явление насыщения фототока в диэлектриках является фактом, указывающим на изменение подвижности электронов с напряженностью поля в диэлектриках.

Более подробно проведены исследования подвижности электронов в полупроводниках, в частности в германии.

Е. Д. Райдер [9] измерял подвижность электронов в германии типа n в интервале напряженностей поля до $2 \cdot 10^4$ В/см. В его опытах были приняты меры для уменьшения тепловых эффектов до минимума. Напряжение на образец подавалось в виде отдельных импульсов длительностью 10^{-7} сек. Опыт показал, что для германия при комнатной температуре закон Ома действителен до полей $6 \cdot 10^2$ В/см. С увеличением поля наблюдается постоянство плотности тока $i = n e v = \text{const}$. Следовательно, если плотность тока сохраняет постоянное значение при росте напряженности поля, то должна уменьшаться или подвижность, или концентрация электронов в германии с ростом поля. Однако в области напряженности поля, где плотность тока сохраняется постоянной, будет также иметь постоянное значение и скорость электронов ($v = 10^7$ см/сек). Это обстоятельство указывает на то, что подвижность электронов уменьшается с напряженностью поля.

В области закона Ома подвижность электронов сохраняет постоян-

ное значение. В более сильных полях, где плотность тока — постоянная величина, подвижность электронов уменьшается с ростом напряженности поля по условию $u \sim \frac{1}{E}$.

Известно экспериментальное исследование подвижности электронов в германии n , проведенное Е. М. Конуэллом и Е. Д. Райдером [10]. Измерения производились при импульсной подаче напряжения. В этих опытах концентрация электронов сохранялась постоянной. Е. М. Конуэлл и Е. Д. Райдер наблюдали изменение подвижности электронов в германии с изменением напряженности поля.

По их экспериментальным данным следует, что подвижность электронов в слабых полях определяется рассеянием электронов примесями и пропорциональна кубу скорости электронов. Поэтому в области поля,

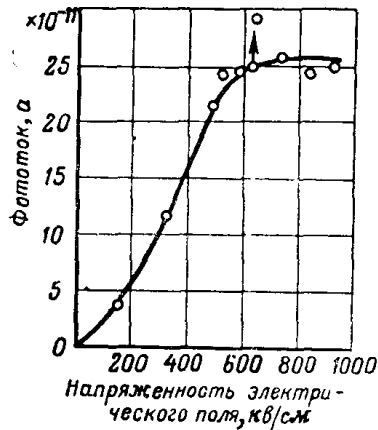


Рис. 11. Фототок в функции напряженности поля в кристаллах КС1 при облучении зеленой линией ртутной лампы ($\lambda = 5461 \text{ \AA}$).

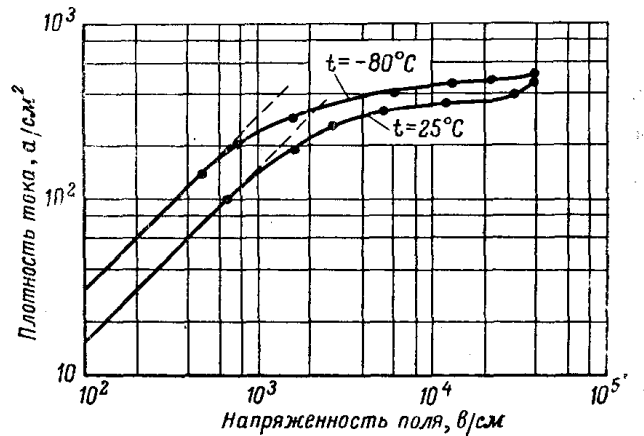


Рис. 12. Изменение подвижности электронов в германии в зависимости от изменения напряженности поля.

где ток начинает расти сильнее, чем это следует по закону Ома, наблюдается сначала рост подвижности электронов. Затем, когда основным фактором, определяющим подвижность электронов, становится рассеяние электронов решеткой, тогда подвижность уменьшается с ростом поля по закону $u \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$.

Такой характер изменения подвижности электронов с напряженностью поля экспериментально наблюдали в германии Е. М. Конуэлл и Е. Д. Райдер.

Е. Д. Райдер и В. Шокли [11] наблюдали (рис. 12) отступление от закона Ома в германии при напряженности поля $E \approx 6 \cdot 10^2 \text{ В/см}$. При этом значении напряженности поля и выше ток оставался постоянным. Концентрация электронов в их опытах сохранялась неизменной до напряженности поля $E \approx 2 \cdot 10^4 \text{ В/см}$. В области закона Ома подвижность электронов оставалась постоянной. В более сильных полях, где ток имеет постоянное значение, подвижность электронов изменяется по условию $u \sim \frac{1}{E}$.

Е. Д. Райдер и В. Шокли дают теоретическое объяснение полученных результатов. Они показывают, что напряженность поля, при которой наблюдается отступление от закона Ома, определяется столкновениями электронов с колебаниями решетки. Если потери энергии электронов обусловлены упругими колебаниями, то граничная напряженность поля соответствует приблизительно $\frac{v_{зв}}{u_0} = 150 \text{ В/см}$, где $v_{зв}$ — скорость продольных звуковых волн, u_0 — подвижность при небольших полях. Если преобладают потери энергии, обусловленные оптическими колебаниями узлов решетки, то граничная напряженность поля будет

выше. Скорость сноса при граничной напряженности поля определяется условием $\left(\frac{h\nu}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$ и принимает постоянное значение, численно равное $\sim 10^7$ см/сек. Эта величина скорости хорошо подтверждается на опыте для германия.

Таким образом, подробные исследования германия показали, что для полупроводников наблюдается на опыте уменьшение подвижности электронов с ростом поля, которое может происходить по закону $\mu \sim \frac{1}{E}$ или $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$.

Приведенные экспериментальные и теоретические данные по подвижности электронов в полупроводниках и диэлектриках позволяют установить две области зависимости подвижности электронов от напряженности поля. В первой области, соответствующей закону Ома, подвижность электронов сохраняет постоянное значение при росте напряженности поля. Во второй области подвижность электронов с ростом напряженности поля уменьшается. Уменьшение подвижности электронов происходит или по закону $\mu \sim \frac{1}{E}$, или $\mu \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$. Например, для полупроводника германия граничной напряженностью поля является $E = 6 \cdot 10^2$ в/см. Для слюды подвижность электронов остается постоянной до $3 \cdot 10^5$ в/см, и от $E = 3 \cdot 10^5$ в/см до 10^6 в/см наблюдается уменьшение подвижности электронов.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований полупроводников в общем приводят к уменьшению подвижности электронов с напряженностью поля. Исключение составляют полупроводники с ионной структурой (по данным Давыдова и Шмушкевича), которые показывают, что подвижность электронов в таких кристаллах должна расти с напряженностью поля.

Е. К. Завадовская [12] из условия возрастания величины E электрической прочности кристаллов с энергией решетки пришла к заключению, что подвижность электронов в кристаллах при высоких напряженностях электрического поля должна уменьшаться.

По исследованиям В. П. Жузе и Е. К. Завадовской [4 и 12], подвижность носителей тока в диэлектриках и полупроводниках зависит от физико-химических характеристик вещества.

Подвижность электронов в кристаллах уменьшается с увеличением теплоты образования (В. П. Жузе), энергии решетки, ширины запрещенной зоны для электронов, с уменьшением постоянной решетки (по Е. К. Завадовской) и связана с другими физико-химическими характеристиками вещества, например электрической прочностью диэлектрика. Подвижность зарядов в кристаллах зависит от внешних условий. Она уменьшается с температурой и напряженностью электрического поля. Заметим, что зависимость подвижности электронов от напряженности поля в изолирующих кристаллах до сих пор не имеет удовлетворительного теоретического объяснения.

А. Д. Щелоков и Н. М. Торбин [13] наблюдали изменение электропроводности монокристаллов и прессованных порошков щелочногалоидных солей при действии рентгеновского излучения. При комнатных температурах облучение кристаллов щелочногалоидных солей, кроме фтористого лития, сопровождается увеличением электропроводности на два-три порядка, как это видно на рис. 13.

При высоких температурах, выше $35-180^\circ\text{C}$ (в зависимости от соли), облучение кристаллов рентгеновыми лучами не сопровождается заметным изменением их электропроводности. Облучение рентгеновыми лучами кристаллов фтористого лития при комнатной температуре сопровождается уменьшением их электропроводности, устойчиво наблюдаемым в продолжение длительного времени и при получении большой дозы облучения (рис 14).

Уменьшение электропроводности при малой дозе рентгеновского облучения наблюдается и для других кристаллов щелочногалогидных солей. Последующее увеличение дозы облучения рентгеновыми лучами сопровождается уменьшением продолжительности отрицательного скачка электропроводности (рис. 15). Наконец, при каких-то относительно больших дозах облучения отрицательный скачок становится почти неуловимым и наблюдается лишь увеличение электропроводности. Для кристаллов фтористого лития наблюдается только уменьшение электропроводности.

Известно, что в кристаллах щелочногалогидных солей при нормальных температурах ток переносится положительными ионами. Изменение

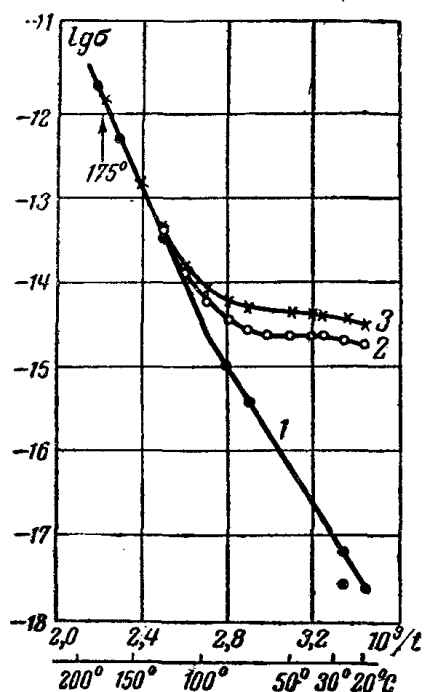


Рис. 13. Изменение электропроводности при облучении кристаллов щелочногалогидных солей в условиях комнатной температуры. NaCl, $U_{mp} = 70$ кВ, $I_{mp} = 10$ ма (2) и 20 ма (3), $E = 20,9$ кВ/см.
1 — без облучения; 2 и 3 — при облучении.

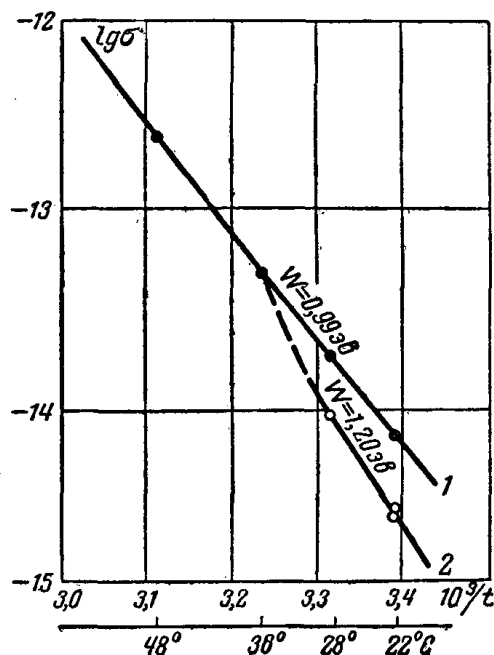


Рис. 14. Изменение электропроводности кристаллов фтористого лития при облучении рентгеновыми лучами в условиях комнатной температуры.
LiF, $U_{mp} = 102$ кВ, $I_{mp} = 3$ ма, $E = 10$ кВ/см.
1 — без облучения; 2 — при облучении.

электропроводности, наблюдаемое при облучении рентгеновыми лучами, может быть обусловлено изменениями подвижности и концентрации положительных ионов или появлением носителей тока другого знака, т. е. электронов, и последующим изменением их концентрации или подвижности. Имеющиеся материалы пока недостаточны для утверждения какой-либо из названных гипотез.

Известный практический интерес действия излучения на материалы требует разработки теории этих вопросов.

Несмотря на большое число работ по пробой твердых диэлектриков, нам очень мало что известно о физике процессов нарушения электрической прочности. Опубликованные теоретические исследования пока не объясняют известных экспериментальных закономерностей пробоя твердых диэлектриков и не указывают путей дальнейших поисков.

Значительный теоретический интерес представляет изучение зависимости электрической прочности от температуры и времени действия.

В. Д. Кучиным измерялась электрическая прочность NaCl, KCl, KBr и KJ при температурах от -130°C до $+150^\circ\text{C}$ на постоянном напряжении и импульсах длительностью $(10^{-4} \div 10^{-8})$ сек. При температурах ниже 0°C электрическая прочность указанных диэлектриков на постоянном

напряжении и импульсах до 10^{-7} сек растет с увеличением температуры со скоростью приблизительно $1,75 \text{ кв/см} \cdot \text{град}$ (рис. 16), что количественно согласуется с теорией Фрелиха. По расчетам Розе при пробое кристаллов плотность электронов достигает 10^{17} 1/см^3 . Как подсчитал Фрелих [15], уже при плотностях электронов в диэлектрике порядка 10^{14} 1/см^3 взаимодействие между электронами сильнее, чем между электронами и колебаниями решетки. С увеличением температуры количество межэлектронных столкновений растет, а следовательно, растет и энергия, теряемая электронами при этих столкновениях. Значит E_{np} должно расти с увеличением температуры.

При температурах выше 0°C наиболее низкие значения E_{np} наблюдаются на импульсах длительностью 10^{-6} сек, что, по-видимому, следует объяснять действием объемного заряда, который образуется при напряжениях длительностью больше 10^{-6} сек. Объемный заряд в ионных кристаллах при рассматриваемых условиях имеет преимущественно ионную природу. В самом деле, время запаздывания разряда в диэлектрике составляет 10^{-8} сек [16, 17], а время, при котором объемный заряд проявляет себя, больше, чем 10^{-6} сек. С увеличением температуры количество ионов, образующих объемный заряд, увеличивается. Следовательно, с повышением температуры действие объемного заряда будет усиливаться, что подтверждают опытные данные.

При $t = 10^{-8}$ сек наблюдается увеличение электрической прочности по сравнению с E_{np} на импульсах длительностью 10^{-6} сек более чем

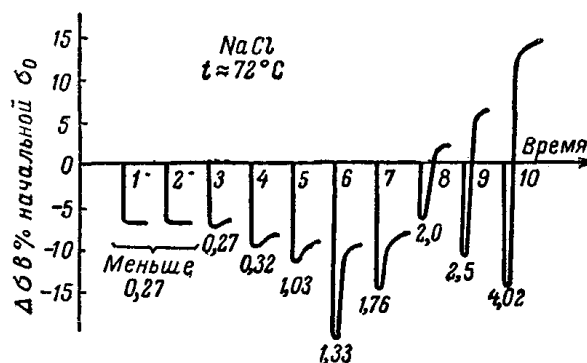


Рис. 15. Последовательное изменение электропроводности кристаллов фтористого лития при облучении их возрастающей дозой рентгеновых лучей.
NaCl, $t \approx 72^\circ \text{C}$.

* — лучи дополнительно ослаблены фильтром.

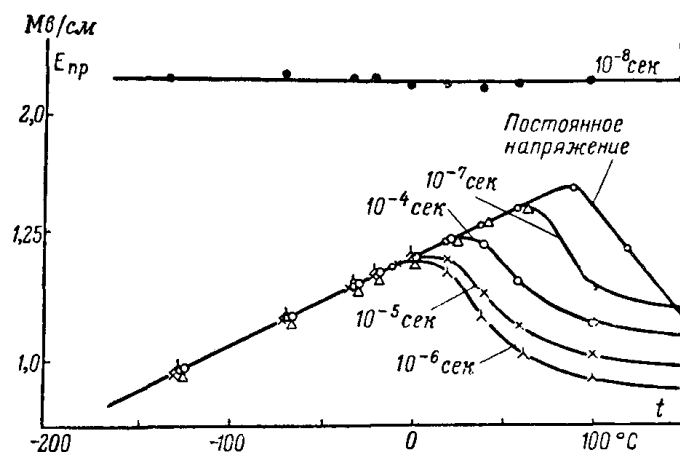


Рис. 16. Изменение электрической прочности кристаллов в зависимости от температуры.

в 2 раза, что связано с запаздыванием разряда в диэлектрике. Электрическая прочность исследуемых ионных кристаллов на импульсах 10^{-8} сек не зависит от температуры, что ни количественно, ни качественно не согласуется ни с одной из существующих теорий пробоя твердых диэлектриков. По-видимому, в этом случае происходит механическое разрушение диэлектрика под действием сильного электрического поля без каких-либо подготовительных процессов.

На возможность такого механического разрушения в электрическом поле указывалось ранее Е. К. Завадовской [18], было подсчитано, что при напряженности поля, близкой к пробивной, в диэлектрике возникают механические усилия, сравнимые с его механической прочностью. Существование механических усилий в диэлектрике, находящемся в сильном электрическом поле, экспериментально доказали Купер и Уолес [19]. При перенапряжениях на образце в 2—3 раза выше пробивного механические усилия в диэлектрике при наличии поля будут превосходить его механическую прочность. Расчеты дают для измеренных значений электрической прочности при времени воздействия 10^{-8} сек механические напряжения в кристаллах NaCl — 45 кг/см^2 , KCl — 17 кг/см^2 , KBr — 11 кг/см^2 , KJ — $6,5 \text{ кг/см}^2$.

По данным В. Д. Кузнецова, прочность на разрыв кристаллов щелочногалогенидных солей изменяется в пределах: для NaCl от 16 до 50 кг/см^2 , для KCl от 15 до 88 кг/см^2 , для KBr от 16 до 40 кг/см^2 , для KJ от 15 до 35 кг/см^2 . Таким образом, при пробое на импульсах 10^{-8} сек в электрическом поле, равном пробивному, в диэлектрике возникают напряжения, превосходящие его механическую прочность. Пробой на импульсах 10^{-8} сек сопровождается сильным дробящим действием и хрупким изломом образцов, чего не наблюдается при пробое на импульсах 10^{-6} сек. Электрическая прочность ионных кристаллов на импульсах 10^{-8} сек не зависит от температуры; механические усилия, возникающие в диэлектрике под действием электрического поля, не зависят от температуры при таких коротких импульсах. Механическая прочность кристаллов при коротких импульсах, вероятно, также не зависит от температуры, и разрушение при коротких импульсах остается хрупким. Для сравнения электрической прочности ионных кристаллов с другими их физико-химическими характеристиками, и в первую очередь с механической прочностью, полезно было бы провести изучение температурной зависимости механической прочности этих кристаллов при коротких временах воздействия.

В связи с независимостью электрической прочности кристаллов от температуры на импульсах 10^{-8} сек в выражение температурной зависимости E_{np} в теориях пробоя ионных кристаллов нужно вводить время приложения напряжения, а также необходимо учитывать при температурах выше 0°C сильное действие объемного заряда на импульсах 10^{-6} сек и больше.

Г. А. Воробьевым [20] были определены зависимости от времени электрической прочности монокристаллов NaCl, KCl, KBr и KJ и органического стекла при пробое в однородном поле (рис. 4). Повышение электрической прочности исследованных монокристаллов при экспозиции $1 \cdot 10^{-7}$ сек и меньше обусловлено запаздыванием разряда. Для суждения о скорости развития разряда важно знать статистическое время запаздывания и время формирования разряда. С этой целью были проведены опыты по пробое рентгенизованной каменной соли при сильном освещении. Равенство электрической прочности рентгенизованной каменной соли и нерентгенизованной при наименьшей экспозиции $2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек показывает, что в монокристаллах NaCl, а также, видимо, и в монокристаллах KCl, KBr, KJ и в органическом стекле статистическое время запаздывания практически отсутствует. Поэтому можно считать, что в исследованных твердых диэлектриках время запаздывания разряда есть время формирования разряда при данных условиях возрастания напряжения. Зная время формирования разряда и толщину диэлектрика, можно определить среднюю скорость распространения разряда.

Полученные в результате расчетов данные позволяют сделать ряд выводов.

Средняя скорость распространения разряда в исследованных твердых диэлектриках имеет порядок 10^6 см/сек . Для ударной ионизации необходима скорость электрона порядка 10^8 см/сек . Такая большая разница в скоростях может быть объяснена рядом обстоятельств. Электрон в твер-

дом диэлектрике вследствие взаимодействия с твердой структурой очень медленно ускоряется, поэтому его средняя скорость будет меньше 10^8 см/сек. Вторым обстоятельством, возможно, является ступенчатость ударной ионизации.

Средняя скорость распространения разряда в исследованных диэлектриках увеличивается с ростом перенапряжения. С ростом перенапряжения на диэлектрике скорость электрона должна возрастать, должна также возрастать вероятность ударной ионизации, а средняя скорость распространения разряда приближаться к средней скорости электрона. Поэтому средняя подвижность электронов в исследованных диэлектриках не меньше 1 см²/сек. Такая же величина была принята Зейтцем [21].

При переходе от NaCl к KJ, т. е. с уменьшением энергии решетки и с увеличением ее постоянной, средняя скорость распространения разряда уменьшается. Уменьшение средней скорости с увеличением расстояния между узлами решетки указывает на преобладающую роль ударной ионизации в процессе пробоя твердых диэлектриков.

Увеличение электрической прочности исследованных диэлектриков при экспозиции 10^{-5} сек и большей, видимо, обусловлено, как это считают многие исследователи, влиянием объемного заряда. Вряд ли можно принять предположение Инуиши и Суита [22] о том, что объемный заряд в твердых диэлектриках, обуславливающий повышение электрической прочности, образуется за счет захвата электронов узлами твердой структуры. Учитывая значительную подвижность электронов и большое время, когда сказывается влияние объемного заряда, следует считать, что указанный объемный заряд образуется в твердых диэлектриках вследствие движения ионов.

К. К. Сончик [23] исследовал запаздывание разряда в кристаллах NaCl и KJ на импульсах с коротким фронтом ($2 \cdot 10^{-8}$ сек) и плоской вершиной. Полученная в его опытах величина средней скорости распространения разряда также составляет порядок 10^6 см/сек. Средняя скорость распространения разряда меньше в KJ, чем в NaCl. В обоих случаях (NaCl и KJ) средняя скорость распространения разряда увеличивается с увеличением перенапряжения.

При исследовании вольт-секундных характеристик каменной соли в случае неоднородного поля также обнаружено запаздывание разряда. Средняя скорость распространения разряда составила в случае отрицательной полярности острия $1,37 \cdot 10^6$ см/сек, в случае положительной полярности острия составила $7,77 \cdot 10^6$ см/сек. При отрицательной полярности острия и малых экспозициях получилась большая величина пробивного напряжения, чем при положительной полярности острия.

При пробое в однородном поле кристаллов с центрами окраски электрическая прочность понижается с уменьшением экспозиции вплоть до 10^{-7} сек и переходе от неокрашенных кристаллов к окрашенным, пробитым в темноте, и к окрашенным, пробитым при освещении. Учитывая большое время образования в окрашенных кристаллах объемного заряда вследствие ухода электронов из *F*-центров [24, 25], следует считать, что за снижение электрической прочности окрашенных кристаллов ответствен не объемный заряд, а фотоэлектроны и *F*-центры.

При пробое кристаллов в неоднородном поле наблюдаются те же закономерности, но они выражены значительно слабее. Особенности в закономерностях пробоя твердых диэлектриков при времени воздействия порядка сотых долей микросекунды также наводят на мысль об особой форме пробоя. Если при более длительном времени воздействия пробой диэлектрика подготавливается электронными процессами, то при коротком времени воздействия пробой представляет собой механическое разрушение диэлектрика в электрическом поле.

В современных теориях, описывающих движение электрона в кристаллической решетке, его взаимодействие с узлами учитывается путем изменения энергии электрона при поглощении или испускании кванта колебательной энергии — фонона.

Колебательная энергия входит линейным членом в выражение энергии решетки, даваемое в теории твердого тела.

Величина наибольшего кванта колебательной энергии, определяемая квантом остаточных колебаний, увеличивается с энергией решетки.

Следовательно, учет колебательной энергии узлов решетки в современных теориях движения электрона в какой-то степени учитывает и свойства кристаллической решетки, ее химический состав и структуру. Однако колебательная энергия узлов решетки является только одной из составляющих энергии решетки. Поэтому можно думать, что такой способ описания выражает только некоторые частные свойства решетки, в первую очередь те свойства, которые характеризуются колебательной энергией.

Более полное описание свойств кристаллов будет достигнуто, если в кинетическое уравнение для электронов будет введена энергия решетки.

Закономерная связь энергии электронных процессов с энергией ионной решетки не учитывается в современных теориях электронных явлений в кристаллах.

При разработке детальной теории электронных явлений в конкретном кристалле и, в частности, при составлении кинетического уравнения для электронов в кристалле для учета роли среды нужно вводить члены, учитывающие связь с энергией решетки.

Изложенные выше экспериментальные материалы показывают взаимную связь и часто взаимную обусловленность физических процессов в изолирующих кристаллах. Наблюдается связь между электронными и ионными процессами. Учитывая, что диэлектрики часто должны работать в сложных условиях одновременного воздействия температуры, механической нагрузки, излучения, электрического и магнитного полей, желательно разрабатывать комплексную теорию электронных процессов в кристаллах, а не только теорию отдельных явлений без взаимной их связи.

Накопленные экспериментальные материалы ждут своего теоретического объяснения.

Литература

1. Шелоков А. Д., О поглощении рентгеновских лучей в щелочногалоидных кристаллах и их твердых растворах. (Представлено на Всесоюзную конференцию по физике твердых и жидких диэлектриков, август 1956 г.)
2. Литвинова П. С., ЖЭТФ, 27, 636, 1954.
3. Соколов В. А., Материалы V совещания по люминесценции, Тарту, 1957.
4. Завадовская Е. К., Результаты экспериментальных исследований подвижности электронов в полупроводниках и диэлектриках в сильных электрических полях, Изв. ТПИ, 82, 1956.
5. Пружинина-Грановская В. И., Изменение сопротивления диэлектриков в магнитном поле (слюда), ЖЭТФ, 10, 8, 878, 1940.
6. Саржевский П. Е., Электропроводность кварца в сильных электрических полях, Автореферат, Томск, 1957.
7. Калабухов Н. П., Вторичные явления в фотопроводящих кристаллах щелочногалоидных солей и роль кристаллических дефектов в этих явлениях, Автореферат, Томск, 1957.
8. Hippel A., Electronic Conduction in Insulating Crystals under Very High Field Strength, Phys. Rev., 54, 1096, 1938.
9. Ryder E. J., Mobility of Electrons in High Electric Field, Phys. Rev., 82, 2, 330, 1951.
10. Conwell E. M. and Ryder E. J., High Field Mobility of Electrons in Germanium with Impurity Scattering Dominant, Phys. Rev., 87, 1, 190, 1952.
11. Ryder E. J. and Shokly W., Mobility of Electrons in High Electric Fields, Phys. Rev., 81, 1, 9, 139, 1951.
12. Завадовская Е. К., Электрический пробой и подвижность электронов в диэлектриках и полупроводниках, Изв. ТПИ, 82, 1956.
13. Шелоков А. Д., Торбин Н. М., Влияние рентгеновских лучей на электропроводность монокристаллов и прессованных порошков щелочногалоидных солей, NaCl и KCl. Сборник аннотаций ТПИ, 1957.
14. Rose A., Phys. Rev., 97, 6, 1538, 1955.
15. Fröhlich H. and Paranjape B. V., Proc. Phys. Soc., 69, 433, 21, 1956.
16. Воробьев Г. А., ЖЭТФ, 30, 2, 256, 1956.

17. Кучин В. Д., Температурная зависимость электрической прочности кристаллов, Сборник аннотаций ТПИ, 1957.
 18. Завадовская Е. К., Диссертация, Томск, ТПИ; ДАН СССР (Доклады Академии наук СССР), 1955.
 19. Cooper R. and Wallace, Proc. Phys. Soc., 66, 1113, 1953.
 20. Воробьев Г. А., Исследование электрического пробоя твердых диэлектриков при различных временах воздействия напряжения, Сборник аннотаций ТПИ, 1957.
 21. Seitz F., Phys. Rev., 76, 9, 1949.
 22. Inuishi J., Suita T., J. Inst. El. Eng. Japan, 74, 2, 150, 1954.
 23. Сончик К. К., О времени запаздывания разрядов в твердых диэлектриках, Сборник аннотаций ТПИ, 1957.
 24. Тартаковский П. С. и Каминкер Д. М., ЖЭТФ, 10, 2, 139, 1940.
 25. Hippel A., Gross E. P., Jelatis J. G. and Geller M., Phys. Rev., 51, 568, 1953.
-