

На правах рукописи

О. С. Хазарадзе

**Методика изучения электрических
свойств и применения твердого
тела в курсе физики X класса
средней школы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
педагогических наук по методике преподавания физики

Научный руководитель — доктор
физико-математических наук, заслу-
женный деятель науки, профессор
Т. И. Какушадзе

На правах рукописи

О. С. Хазарадзе

**Методика изучения электрических
свойств и применения твердого
тела в курсе физики X класса
средней школы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
педагогических наук по методике преподавания физики

Научный руководитель — доктор
физико-математических наук, заслу-
женный деятель науки, профессор
Т. И. Какушадзе

В законе «Об укреплении связи школы с жизнью и о дальнейшем развитии системы народного образования в СССР» сказано:

«Главной задачей советской школы является подготовка учащихся к жизни, общественно-полезному труду, дальнейшее повышение уровня общего и политехнического образования, подготовка образованных людей, хорошо знающих основы наук, воспитание молодежи в духе глубокого уважения к принципам социалистического общества, в духе идей коммунизма».

В процессе обучения физике осуществление этой главной задачи, поставленной перед советской школой, невозможно до тех пор, пока последовательно и осмысленно не будут изучены основы физической науки, пока содержание школьного курса физики максимально не будет приближено к современному уровню физической науки. Школьный курс физики должен быть написан на основе современных физических представлений. С этой точки зрения ознакомление учащихся с электрическими свойствами и применением твердых тел является одним из важнейших средств укрепления связи школы с жизнью и улучшения качества преподавания физики.

Согласно ныне действующей программе и стабильному учебнику электрические свойства твердых тел изучаются на основе классической электронной теории. По нашему мнению, **в соответствии с современным уровнем развития физики электрические свойства твердого тела должны изучаться в средней школе на основе современной (квантовой) теории вещества с привлечением правильных наглядных представлений электронной теории.**

Целью нашей диссертационной работы является постановка и разрешение наиболее важных вопросов, связанных с осуществлением вышеуказанной основной методической идеи. При этом мы глубоко уверены в необходимости более широкого развертывания методической работы по вопросам преподавания электрических свойств твердого тела на основе квантовой теории.

Диссертация состоит из предисловия, пяти глав и указателя литературы.

МЕТОДИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ ОБ ИЗУЧЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОГО ТЕЛА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ

В диссертационной работе рассматривается роль и место электрических свойств твердого тела в курсе физики средней школы, обосновывается учебно-воспитательное и общеобразовательное значение этой темы.

В свете современных квантовых представлений коротко изложены затруднения классической электронной теории.

Стабильный учебник физики и действующая программа проанализированы с точки зрения нашей основной методической идеи, которая диаметрально противоположна их методической направленности. В учебнике специально выделен вопрос — «Электронная теория» (§ 7). Фактически в нем ничего не говорится об электронной теории, поскольку не изложены ее основные положения и понятия, не даются ответы на вопросы: в чем заключается свобода электрона, как возникает свободный электрон в металле, почему в отличие от металлов в диэлектриках не имеется свободных электронов и др. Поскольку старая программа по физике не предусматривала изучения полупроводников, то учебник почти не касается этой темы. При изучении электрических свойств твердых тел учебник больше напоминает курс электротехники, чем физики.

В результате анализа методической литературы ([22, 64, 85—89, 99, 102, 104, 105, 108, 110]) мы заключаем, что за последние годы методическая мысль направлена на обоснование необходимости изучения электрических свойств твердого тела в школьном курсе физики на основе квантовой теории и разработку соответствующей методики.

В работе обосновывается необходимость введения квантовых представлений при объяснении электрических свойств твердого тела. Анализ развития современной науки приводит к выводу, что основу какой-либо физической теории составляют энергетические представления. Если с этой точки зрения подойти к школьному курсу физики, не вызовет сомнения то обстоятельство, что изучение электрических свойств твердого тела должно вестись на основе «зонной» теории. Именно эта теория базируется на энергетических представлениях — принципе запрета Паули и дискретности энергии электрона.

Общепризнанно, что преподавание основ наук в средней школе необходимо вести таким образом, чтобы учащихся не пришлось «переучивать», т. е. знания, полученные в школе,

заменять знаниями противоположного характера. Приведу такой пример. В § 28 стабильного учебника (А. В. Перышкин, Курс физики, ч. III) говорится: «В отсутствие электрического поля **свободные электроны** в металле находятся в беспорядочном движении, причем **их скорости, как и скорости молекул, зависят от температуры металла**» (курсив наш, О. Х.). Подчеркнутое положение является одним из основных положений классической электронной теории. Оно было отвергнуто квантовой теорией, согласно которой, закон зависимости кинетической энергии (скорости) от температуры, имеющий место для молекул, неприменим для свободных (коллективизированных) электронов. Ясно, что нет никакой необходимости давать в школе отвергнутые положения классической физики, даже в том случае, если учащиеся их лучше понимают и усваивают.

Введение элементов квантовой (зонной) теории в школьный курс физики обусловлено также и тем, что электрические (как и другие) свойства веществ должны изучаться в тесной связи с их структурным и электронным строением, даже больше, они должны вытекать из последнего.

Кроме вышесказанного следует принять во внимание еще одно обстоятельство. Редко случается, чтобы изложение электрических свойств твердого тела в научно-популярной литературе ограничивалось классическими представлениями и, хотя бы элементарно, не велось на основе зонной теории. Не будет слишком претенциозным если скажем, что из школьного курса физики учащиеся должны приобретать знания в объеме, достаточном для чтения научно-популярной литературы без получения специального образования.

Могут возразить и сказать, что рассмотрение электрических свойств твердого тела с привлечением квантовых представлений будет носить ненаглядный, догматический характер и поэтому не стоит идти по такому пути преподавания. Пусть не забывают такие скептики, что в школьном курсе физики не менее догматически преподносятся «наглядные» положения классической электронной теории, хотя бы понятие свободных электронов, утверждение об их отсутствии в диэлектриках и др. По рекомендованной нами методике принцип запрета Паули действительно приходится сообщать учащимся догматически без указания какого-либо конкретного физического эксперимента. Но это и невозможно. Искоренение формального усвоения этого принципа достигается его регулярным применением при изложении последующего материала, а истинность доказывается экспериментальным подтверждением выводов, сделанных с его применением.

При изложении наших методических соображений и обоснованной рекомендованной методики мы указываем, что основные положения квантовой (зонной) теории при первом ознакомлении являются для учащихся почти столь же ненаглядными и непривычными, как и для взрослых, скажем, студентов физико-математического факультета. Учитывая данный психологический фактор эта непривычность должна устраняться на раннем этапе изучения физики, именно, в средней школе (как и в случае со строением атома и его энергетическим спектром).

Мы считаем целесообразным изучение электрических свойств веществ в курсе электричества вести в следующей последовательности:

1. Общие закономерности электрического тока.
2. Электропроводность жидкостей.
3. Электропроводность газов. Опыт Франка и Герца. Энергетический спектр атома.
4. Электропроводность твердых тел. Элементы зонной теории.

Такая последовательность продиктована необходимостью учета сложности электрических и магнитных свойств твердых тел, по сравнению со свойствами жидкостей и газов. Она имеет также определенную методическую ценность в том отношении, что позволяет до изучения электрических свойств твердых тел рассмотреть вопрос об энергетическом спектре атома. Это дает возможность теоретического объяснения свечения газов при прохождении тока, излучения спектров и оптических свойств веществ при изучении соответствующего экспериментального материала.

После теоретического и экспериментального изучения электрических свойств твердых тел (металлы, диэлектрики, полупроводники) указываются области их применения и приводятся наиболее характерные примеры. Такая методика в наибольшей степени способствует развитию интереса учащихся к изучаемому предмету, поскольку они убеждаются в необходимости теоретического обобщения и осмысления фактического материала для его сознательного применения на практике.

В диссертационной работе указывается, что при обучении по рекомендованной нами методике, специального разрешения потребует вопрос бюджета времени. Следует поискать время для преподавания следующих внепрограммных вопросов:

1. Зависимость величин тока от электрического поля. Удельная электропроводность (1 урок).

2. Дискретность энергии атома. Опыт Франка и Герца (1 урок).

3. Электропроводность диэлектриков (1 урок).

4. Зонная теория твердого тела (1 урок).

Очевидно, придется для изучения второго вопроса выделить время в теме «Ток в газах», а для остальных в теме «Ток в металлах». Что касается других вопросов, то они либо программные, либо рассматриваются в качестве упражнений и поэтому не требуют выделения дополнительного времени.

Глава II.

МАТЕРИАЛ, ИЗУЧАЕМЫЙ В VIII—IX КЛАССАХ И В ОТДЕЛЕ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ КУРСА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА X КЛАССА

Известно, что для глубокого осмысления какого-либо понятия ценным методическим приемом является его сравнение с противоположным понятием. Понятия прерывности (дискретности) и кванта энергии сравнительно легче воспринимаются и понимаются учащимися, когда они имеют представление о непрерывном характере изменения энергии. С этой целью понятие энергетического уровня должно быть введено как можно раньше. Впервые это может быть сделано при изучении понятий кинетической и потенциальной энергий. При энергетической характеристике макротел указывается, что они могут иметь любые энергии. Так, например, спутники могут быть запущены на любую высоту, на любой уровень, относительно Земли. С этой точки зрения термин «любое значение энергии» может быть заменен термином «любой энергетический уровень». Понятие о непрерывности энергии вводили при изучении отдела «Молекулярная физика и теплота».

Для лучшего уяснения дальнейшего рассмотрения изменения энергий частиц на основе квантовых представлений, вводим понятие «классической частицы». Ее мы определяем следующим образом: Классической называется частица, возможные значения энергий (энергетические уровни) которой составляют непрерывный ряд.

В работе рассматривается сущность тепловых дефектов кристаллической решетки и указывается на необходимость введения в школьный курс физики понятия тепловых дефектов (наряду с другими видами дефектов), поскольку их наличие даже в идеально чистом металле является причиной ко-

ичной величины электропроводности. (поток свободных электронов рассеивается на тепловых дефектах).

Поскольку в твердом теле концентрация коллективизированных электронов порядка атомной концентрации, необходимо научить учащихся рассчитать ее. А это, в свою очередь, даст возможность в качестве задач-упражнений вычислить средние межатомные расстояния и радиусы атомов. В работе приводятся соответствующие примеры.

С целью изучения электрических свойств веществ на основе общей теории на первых же уроках по электростатике в X классе необходимо сообщить учащимся сведения о строении атома. По нашему мнению, здесь не только необходимо напомнить им материал, пройденный ими в свое время (VIII кл.) догматически, но и обосновать ядерное строение атома на основе разбора классического опыта Резерфорда. Это нужно будет сделать сразу после изучения закона Кулона. Для иллюстрации рассеяния α частиц на золотой фольге полезно использовать механическую модель (рис. 5), в которой аналогия проводится между α частицами и металлическими шариками. После этого с применением закона Кулона решаются задачи, содержащие данные о ядрах и обращающихся вокруг них электронах. Это способствует укреплению интереса учащихся к изучению процессов, имеющих место в мире атома и создает прочную основу для глубокого понимания дальнейшего материала.

На основе рассмотрения двух одновалентных атомов с перекрывающимися валентными орбитами разъясняется механизм возникновения ковалентной связи и коллективизированных электронов в твердом теле. Здесь учащимся указывается, что по классической терминологии коллективизированные валентные электроны металла, потерявшие связь со своими атомами, но находящиеся под воздействием остатков других атомов-ионов, называются свободными. Предложенная здесь методика дает возможность обосновать возникновение электронного газа в металле, хаотический характер движения коллективизированных электронов и порядок их концентрации $\left(10^{22} \dots 10^{23} \frac{\text{эл}}{\text{см}^3} \right)$. Даются примеры решения задач на скорость и энергию коллективизированных электронов. После такого преподнесения материала не представит особой трудности доступно объяснить учащимся в чем заключается особая прочность металлов. На основе решения задачи о взаимодействии двух

ионов металла с электроном между ними учащиеся заключают, что прочность металла обусловлена кулоновским взаимодействием коллективизированных электронов с ионами металла (электронный газ играет роль „цементирующего“ материала).

В работе дается методика введения понятия работы выхода и решен ряд задач на эту тему. Мы считаем, что понятие работы выхода должно быть широко использовано при объяснении различных физических явлений, таких как: электризация тел соприкосновением, термоэлектронная эмиссия, возникновение катодных лучей, термоэлектрический эффект, фотоэффект и др.

Глава III.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ДИСКРЕТНОСТЬ ЭНЕРГИИ АТОМА

В диссертационной работе мы показываем целесообразность вывода общих закономерностей постоянного электрического тока на основе материала, изученного учащимися в VIII классе и в отделе электростатики (до изучения электрических свойств конкретных веществ). После вывода формулы $J = encS$, в результате её анализа заключаем, что условием существования тока в проводнике является наличие в нём свободных зарядов ($e \neq 0, n \neq 0$) и электрического поля ($V \neq 0, E \neq 0$). Величина тока, созданного движением зарядов противоположного знака рассчитывается по формуле $J = J_+ + J_-$. Это дает возможность ввести формальное правило — в необходимых случаях мы можем вместо движения потока положительных зарядов рассмотреть движение отрицательных зарядов (в обратном направлении) и наоборот. (Это формальное правило приходится использовать, напр., при рассмотрении действия магнитного поля на проводник с током).

Для исследования характера возникновения тока, его величины и ее зависимости от природы проводников, учащимся дается классический вывод закона Ома ($i = \sigma E$) и формулы для определения удельной электропроводности проводника $\left(\sigma = \frac{ne^2\lambda}{2m\mu} \right)$.

Методическое назначение рассмотрения этой последней заключается в том, что ее потом можно использовать для глубо-

кого рассмотрения и сравнения электропроводностей электролитов, газов и твердых тел.

В диссертационной работе мы не касаемся вопроса о том, каким образом должна быть произведена конкретизация общих закономерностей электрического тока при изучении тока в жидкостях и газах. Из последней темы мы рассматриваем только два вопроса непосредственно связанных с разрешением поставленной перед нами задачи.

При изучении тока в газах учащиеся убеждаются в том, что различные газы находясь в одинаковых условиях при прохождении тока испускают свет различного цвета. Очевидно это явление связано с особенностями строения атомов и молекул газа. Учащимся сообщается, что опыты Франка и Герца после знаменитых опытов Резерфорда значительно обогатили наши представления о строении атома. Рассматривается схема этих опытов, график зависимости тока от энергии электронов прошедших через сетку. В результате делается вывод, что **изменение энергии (увеличение, уменьшение) любого атома может произойти не на произвольную величину, а в виде квантов энергии, характерных только для данного атома.** Отсюда, в свою очередь, заключается, что значения энергий атома составляет прерывистый (дискретный) ряд. Учащимся сообщается, что в этом заключается квантовый закон дискретности энергии атома, высказанный за год раньше в виде гипотезы Н. Бором.

В диссертационной работе излагается методика и содержание вопроса — «Энергетический спектр изолированного атома». Рассматривается энергетический спектр атома водорода, а затем ставится вопрос — каков же энергетический спектр многоэлектронных атомов? Здесь впервые формулируется принцип запрета Паули, согласно которому в многоэлектронных системах одинаковыми энергиями не могут обладать более чем два электрона, иначе, на одном и том же энергетическом уровне могут находиться только один или два электрона, или же энергетический уровень вообще не будет занят. Учащимся даются понятия об энергетических уровнях — валентном и возбуждения. Предлагается задача за определение скорости электрона, способного вызвать ионизацию атома водорода.

В методических примечаниях указывается, что изготовление трехэлектродных трубок, наполненных парами ртути, для воспроизведения опытов Франка и Герца не представляет трудности для нашей учебной промышленности и, поэтому, свободно может быть налажено ее серийное производство.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

IV глава диссертационной работы посвящена изложению конкретной методики введения в курс электричества X класса основных идей и понятий квантовой (зонной) теории и объяснения на их основе электрических свойств твердого тела.

Ко времени изучения электрического тока в твердом теле учащимся уже известно, как в результате конденсации изолированных атомов в металле, в последнем возникают коллективизированные валентные электроны. Поэтому не вызовет никаких возражений утверждение, что коллективизированные валентные электроны должны существовать в любом твердом теле. Здесь только добавлено утверждение, что как для совокупности электронов изолированного атома, так и для совокупности коллективизированных валентных электронов любого твердого тела справедливы закон дискретности энергии и принцип запрета Паули.

Для введения понятия энергетической зоны рассматривается совокупность N двухвалентных атомов, находящихся друг от друга на расстоянии порядка 10^{-8} см (как это на самом деле имеет место в твердом теле). При этом очевидно, получится $2N$ коллективизированных валентных электронов. По принципу запрета Паули среди них одинаковыми энергиями будут обладать только два электрона и не более. Значит эти $2N$ коллективизированных электронов могут находиться на N энергетических уровнях, которые по закону дискретности энергии отстоят друг от друга на определенном энергетическом интервале. Таким образом, вместо одного энергетического уровня $2N$ валентных электронов, в случае их коллективизации, в N изолированных атомах получается совокупность N энергетических уровней в твердом теле. Совокупность энергетических уровней одного и того же происхождения называется **энергетической зоной**. Ввиду этого совокупность энергетических уровней коллективизированных валентных электронов твердого тела называется **валентной энергетической зоной**.

Совершенно по тем же причинам, вместо одного энергетического уровня возбуждения (в изолированных атомах) в твердом теле получится совокупность N энергетических

уровней возбуждения. Они составляют новую зону, которая называется **энергетической зоной проводимости**.

Здесь важно подчеркнуть, что речь идет о распределении коллективизированных электронов по энергиям, а не их пространственном распределении в кристалле.

Как энергетические уровни в пределах одной зоны, так и сами зоны, отделены друг от друга запрещенным энергетическим интервалом. Энергетический интервал между валентной зоной и зоной проводимости называется **запрещенной энергетической зоной**.

Когда в твердом теле создано электрическое поле, на его коллективизированные электроны начинают действовать электрические силы. В результате электроны станут двигаться ускоренно, т. е. приобретут некоторую кинетическую энергию. Проведя несложный расчет, мы выясняем, что в металлах коллективизированные электроны могут приобрести энергии порядка 10^{-9} эв. Но с другой стороны это означает, что электрон должен попасть на высший энергетический уровень. Стало быть вблизи занятого энергетического уровня коллективизированного электрона металла непременно должен существовать свободный уровень. Очевидно, это возможно только в том случае, если ширина запрещенной энергетической зоны меньше 10^{-9} эв. Практически в металлах зоны возбуждения и валентная перекрываются, так что для металла вообще нет смысла говорить о запрещенной энергетической зоне (энергетический интервал между дозволенными уровнями оказывается порядка $\Delta E \approx 10^{-22}$ эв.).

Плохая электропроводность диэлектрика, очевидно, объясняется тем, что в нем свободный энергетический уровень коллективизированного электрона находится очень далеко от занятого. Поэтому электрическое поле не способно сообщить электронам энергии достаточные для преодоления запрещенной энергетической зоны.

По сравнению с диэлектриками полупроводники обладают лучшей электропроводностью, но заметно худшей, чем металлы. Очевидно, это надо понимать так, что ширина запрещенной энергетической зоны полупроводников меньше, чем у диэлектриков, но значительно больше, чем у металлов.

Таким образом, в результате логического анализа экспериментальных данных и привлечения квантовых идей, делается вывод, что различия между электрическими свойствами твердых тел обуславливаются:

1. Шириной запрещенной энергетической зоны (E).

2. Степенью заполнения дозволенных энергетических зон.

Для металлов $E_m = \Delta E = 10^{-22}$ эв,

.. полупроводников $E_n = 0,01 \text{ — } 3$ эв.

.. диэлектриков $E_d \geq 3$ эв.

Рекомендованная нами методика позволяет дать квантовое определение свободного электрона. Свободным называется электрон, имеющий в своей окрестности свободные энергетические уровни, на которые он может перейти в сравнительно слабых электрических полях ($E \approx 10^{-3}$ в/см). С этой точки зрения, коллективизированные электроны металлов можно называть свободными и сказать, что в диэлектриках свободных электронов нет. Несложным расчетом показывается, что для создания заметного электрического тока, т. е. для перевода коллективизированных электронов в зону проводимости, в диэлектрике должно быть создано электрическое поле напряженностью порядка 10^6 в/см.

Электропроводность полупроводников (на одном уроке) объясняется, как на основе модельных, так и зонных представлений на примере собственной электропроводности германия. Учащимся должно быть разъяснено, что при абсолютном нуле температуры полупроводник является диэлектриком, а при отличной от нуля температуре у него появляется смешанная проводимость — электронная и дырочная. Отсутствие при $T > 0^\circ\text{K}$ отрицательного заряда (электрона) в связи между атомами равноценно присутствию там положительного заряда. Поэтому «дырка» определяется как такая искаженная связь, которой приписывается положительный заряд. В зонном представлении дыркам соответствуют незанятые, свободные энергетические уровни валентной зоны. Электрический ток в собственном полупроводнике представляет собой арифметическую сумму электронного и дырочного токов. Здесь же указывается, что характер электропроводности полупроводника можно в сильной степени изменять введением примесей. Полупроводник *n* — типа (электронная проводимость) получается введением примесных атомов элементов V группы, а *p* — типа (дырочная проводимость) введением примесных атомов элементов III группы периодической системы Менделеева.

Примесную проводимость полупроводников (рассматриваемую на основе как модельных, так и зонных представле-

ний) мы не считаем целесообразным давать учащимся. В работе-материал по этому вопросу приводится в качестве справки для преподавателей.

С нашей точки зрения некоторые электрические закономерности в X классе должны быть выведены дедуктивным путем — из имеющихся у учащихся знаний, а затем подтверждены экспериментом. Это в большой степени способствует развитию логического мышления учащихся, укрепляет их веру в свои знания, делает эти знания более активными, а приобретаемые умения и навыки — осознанными. В свете таких представлений мы рекомендуем изучить все последующие вопросы за исключением «сверхпроводимости».

При выводе закона Ома для участка цепи вспоминаем известные учащимся соотношения $I = \sigma SE$ и $E = \frac{U}{l}$. Находим

$I = kU$, где $k = \sigma \frac{S}{l}$ — электропроводность проводника. Ставим вопрос: почему ток в проводнике изменяется прямо пропорционально напряжению? Возрастание напряжения на концах проводника вызывает усиление электрического поля в проводнике ($E \sim U$). Это, в свою очередь, способствует увеличению скорости направленного движения свободных электронов ($V \sim E$). Последнее же обстоятельство вызывает увеличение количества зарядов, проходящих через поперечное сечение проводника в единицу времени, т. е. тока ($I \sim V$). Для лучшей наглядности и запоминания эту цепь рассуждений представляем следующей логической схематической записью: $I \sim V \sim E \sim U$.

Из соотношения $k = \sigma \frac{S}{l}$ видно, что для данного вещества (σ) электропроводность (k) зависит от технических характеристик образца (S, l), в то время, как удельная электропроводность определяется только природой самого проводника — условиями перемещения потока свободных электронов в нем. Поэтому σ представляет собой физическую характеристику проводника и её изучение является более ценным для определения электрических свойств.

Целесообразно рассмотреть с учащимися выражение для σ :

$$\sigma = \frac{ne^2\lambda}{2mi}$$

Разъясняем, что e и m не зависят от состояния (кристаллическая решётка, температура) металла. Коллективизация электронов в металле происходит под действием электрических сил взаимодействия между атомами, практически независимых от температуры, поэтому уже при абсолютном нуле температуры коллективизируются все валентные электроны. Значит n не зависит от температуры. Также не зависит n от электрического поля, величина напряженности которого в металле недостаточна для отрыва электронов от атомов. Значит n для металлов — постоянная величина. Скорость хаотического движения свободных электронов металла не зависит от температуры и от электрического поля (последнее меняет только скорость направленного движения).

Остается рассмотреть только закономерности изменения λ . Здесь мы подходим к разъяснению сущности электрического сопротивления проводника. Значение λ не зависит от электрического поля.

Согласно квантовым представлениям поток направленно движущихся свободных электронов испытывает препятствия своему движению только на неоднородностях, искаженных кристаллической решётки. Встреча с ними вызывает рассеяние потока электронов, уменьшение скорости их направленного движения. Длина свободного пробега (λ) (расстояние между двумя ближайшими столкновениями) зависит от количества этих искажений. В неискаженном кристалле (идеальный случай) $\lambda = \infty$ и $\sigma = \infty$. Практически среднее значение $\lambda \sim 10^{-6}$ см, что определяет конечное значение σ . Это свойство реальных проводников мы называем сопротивлением.

При неизменной температуре проводника λ остается постоянной. Так как в законе Ома σ предполагается постоянной, то, очевидно, этот закон имеет место при неизменной температуре проводника. Об этом условии выполнения закона Ома для участка цепи должны помнить учащиеся.

Зависимость сопротивления проводника, а значит и величины тока (I) от сечения (S) и длины (l) проводника объясняется по следующим логическим схемам $I \sim N \sim S$ и $I \sim V \sim E$

$\sim \frac{1}{l}$, где N — количество зарядов, прошедших через поперечное сечение проводника за единицу времени.

Зависимость сопротивления проводника от температуры определяется характером зависимости длины свободного пробега свободных электронов от температуры. Результаты теоретических рассуждений учащиеся записывают по следующей логической схеме: возрастание температуры металлического проводника \rightarrow увеличение количества дефектов кристаллической решетки \rightarrow уменьшение длины свободного пробега электронов \rightarrow возрастание удельного сопротивления. Кристаллическая решетка сплава по сравнению с решеткой чистого металла уже настолько искажена, что изменение его температуры очень мало влияет на количество этих искажений. Отсюда — слабая зависимость удельного сопротивления сплавов от температуры по сравнению с чистыми металлами.

В полупроводниках движению свободных электронов мешает та же причина, которая действует в металле. Она заключается в рассеянии потока свободных электронов на дефектах кристаллической решетки. Поэтому малая электропроводность полупроводников по сравнению с металлами, согласно формуле $I = evnS$ должна быть объяснена малым значением концентрации свободных электронов (n). При обычных температурах $n = 10^{12} \cdot 10^{18} \frac{\text{эл}}{\text{см}^3}$. Надо полагать, что в полупровод-

никах коллективизированные электроны попадают в зону проводимости за счет тепловой энергии кристаллической решетки или же за счет падающей на него световой энергии. Если это так, то следует ожидать увеличения электропроводности полупроводников с увеличением температуры и освещенности, т. е. при этом коллективизированные электроны получают большие энергии, идущие на преодоление запрещенной энергетической зоны. На ряде демонстрационных опытов подтверждаем справедливость этого теоретического вывода.

Внутренний фотоэффект определяется как явление, при котором происходит освобождение коллективизированных электронов. Полупроводники, в которых активно проявляется явление внутреннего фотоэффекта, называются фотосопротивлениями. Демонстрируем фотореле. Учащимся даем представление о фотоэлементах, которые при освещении сами становятся источниками тока (превращая световую энергию в

электрическую). Объяснение учащимся на уроке принципа действия фотоэлемента считаем методически нецелесообразным.

Термоэлектрические свойства полупроводников (явление Зеебека и Пельтье) учащимся объясняем без привлечения зонных представлений, опираясь на понятие диффузии электронов от горячих мест к холодным. Выделение же вопроса о термоэлектрических свойствах металлов считаем нецелесообразным. Рассматривается термопара, состоящая из полупроводников n - и p -типа. Разъясняется, почему термоэлектродвижущая сила была бы меньше при взятии пары полупроводников одинакового, допустим, n -типов.

На основе этого делаем заключение, что металлическая термопара, при прочих одинаковых условиях, дала бы меньшую ЭДС. Демонстрируем самодельную полупроводниковую термопару, металлическую термопару, термоэлектрогенератор, разрез термохолодильника в эпипроекции.

Принцип действия полупроводниковых выпрямителей объясняем на основе модельных представлений. Обращаем внимание учащихся на тот факт, что выпрямляющее действие (односторонняя проводимость) является свойством не полупроводникового кристалла, а контакта полупроводников различного типа проводимости. Понятие запирающего слоя даем на основе рассмотрения диффузии электронов и дырок на границе полупроводников. Рассматриваем вольтамперную характеристику твердого выпрямителя. Демонстрируем выпрямляющее действие плоскостного диода и купроксного выпрямителя.

При изучении электрических свойств полупроводников надо выполнить хотя бы одну лабораторную работу. В диссертации излагается содержание и методика проведения двух работ, основной целью которых является привитие учащимся элементарных умений и навыков по экспериментальному изучению свойств полупроводников. С этой точки зрения при выполнении работы по сборке фотореле с фотосопротивлением особое внимание должно быть обращено на выяснение характера зависимости электропроводности фотосопротивления от светового потока. В качестве одного из контрольных вопросов предлагается использовать фотосопротивление для измерения светового потока.

При выполнении работы по построению вольтамперной характеристики диода учащиеся знакомятся с устройством точечного и плоскостного диодов, отвечают на контрольные вопросы: справедлив ли закон Ома для контакта полупровод-

ников, какие выводы можно сделать из сравнения твердого лампового выпрямителей и др.

С целью развития логического и технического мышления учащихся во время изучения свойств полупроводников предлагаются учащимся вопросы и задачи, содержание которых приводится в диссертации. Под конец, учащиеся составляют сравнительные и сводные таблицы по свойствам и применению электрических свойств всех трех классов твердых тел.

Глава V.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ РЕКОМЕНДОВАННОЙ МЕТОДИКИ

Основной целью педагогического эксперимента являлось установление содержания, объема и места в курсе физики материала по электрическим свойствам и применению твердого тела.

Действенность рекомендованной методики проверялась качеством усвоения учебного материала и на основе анализа процесса формирования понятий. Параллельно мы работали над установлением тех основных методов и приемов, с использованием которых достигалась наибольшая эффективность как передачи, так и усвоения учащимися материала. Результаты, полученные в ходе педагогического эксперимента, учтены при изложении содержания и методики соответствующих вопросов в диссертационной работе.

Основной путь, по которому мы вели весь процесс обучения, заключается в воспитании умений — навыков самостоятельного логического мышления учащихся посредством максимальной активизации их умственной и практической деятельности.

Большое количество вопросов, подлежащих изучению вне программы, вынуждало нас проводить экспериментальную проверку рекомендованной методики как на уроках физики, так и на уроках электротехники и в ходе внеклассной работы. Это же обстоятельство затруднило проведение педагогического эксперимента в широком масштабе. Оно проводилось в основном в одной школе (средняя школа № 50 г. Тбилиси) с 1957 по 1962 год. По нашей методике в этой школе обучалось до 230 учащихся.

По предлагаемой методике нами читались и обсуждались доклады на методобъединениях преподавателей физики и на республиканских научно-педагогических конференциях в 1959 — 60 годах.

Наша педагогическая практика убедила нас в том, что интерес учащихся к объяснению физических явлений, их теоретическому обоснованию подчиняется общим закономерностям воспитания и развития.

Учащиеся, привыкшие к индуктивному мышлению, не способны мыслить дедуктивно, не в состоянии глубоко проникнуть в физическую сущность явлений, сделать теоретические и практические выводы.

Когда мы говорим о результатах нашей педагогической практики и вместе с тем касаемся некоторых вопросов методики преподавания физики, мы хотим ясно провести мысль о том, что текст учебника сам по себе еще не определяет эффективность обучения, качества урока. Это последнее в значительной степени зависит от творческого подхода преподавателя к учебному процессу, от его умения привести учащихся к конечной цели, вызывая в них обычные и доступные для них ассоциации и образы. Исходя из этого в диссертационной работе мы коротко излагаем наш опыт в деле обучения учащихся электрическим свойствам твердого тела.

В процессе обучения мы приучали учащихся мыслить с использованием логических схем. Под логической схемой мы подразумеваем тот типичный план, по которому происходит изучение какого-нибудь явления, понятия или прибора. Так, например, рассмотрение и формирование физических явлений и понятий мы производили в следующей последовательности.

1. Качественная сторона явления (понятия);
2. Словесное выражение, определение явления (понятия);
3. Количественная сторона явления (понятия);
4. Проявление, использование явления (понятия) в природе и практике.

Рассмотрение и изучение приборов и материалов мы производили в следующей последовательности:

1. Назначение, основное свойство;
2. Устройство, строение, схема;
3. Принцип действия и конкретный механизм функционирования;
4. Сравнение с известным прибором (материалом);
5. Условное обозначение;
6. Использование на практике.

Требуя от учащихся соблюдения вышеуказанной последовательности при изложении или в практической работе, мы убедились, что это помогало им представить новые явления, понятия и приборы в осмысленном, логическом аспекте, приучало их наметить и выполнить план изучения и, что самое

главное, не оставляло места для непоследовательной, стихийной работы. Иногда с целью большей активации умственной деятельности учащихся мы изменяли порядок элементов принятой логической схемы, но так, чтоб они все были бы выполнены. Наш опыт убеждает нас в том, что использование подобных логических схем, несмотря на возможное их несовершенство, производит также определенное психологическое воздействие — повышает интерес учащихся к изучаемому материалу, концентрирует внимание и способствует запоминанию, в общем, дисциплинирует умственную деятельность учащихся.

В работе приводятся примеры, поясняющие каким образом приучали мы учащихся к использованию таких логических приемов, как сравнение, абстрагирование, обобщение, аналитико-синтетический разбор изучаемого материала, умозаключения. Прибегая к аналогиям нередко допускали гипотезы, справедливость которых проверяли на опыте. Следуя такой методике мы не могли не обозначать отдельные этапы мышления логическими терминами. Кстати, заметим, что одной из причин формализма в знаниях учащихся мы считаем неиспользование логических терминов в речи преподавателя (а также в учебнике), особенно в X — XI классах. Без этого у учащихся трудно прививаются умения и навыки использования логических приемов, туго развивается потребность в обоснованном последовательном мышлении. Значение и смысл используемых логических терминов должны быть понятны учащимся из контекста при их регулярном использовании.

Учитывая большое психологическое воздействие «проблемного изложения материала» в смысле повышения заинтересованности и активности учащихся, мы старались ставить и решать проблему, опираясь на умственные возможности учащихся, а не на авторитет преподавателя. С целью иллюстрации развиваемых выше соображений в диссертационной работе даны примеры из нашей практики. В частности показано, как методом беседы мы приводили учащихся к усвоению понятий энергетических зон и как проводилось изучение фотореле.

В конце V главы мы резюмируем результаты нашего педагогического эксперимента в виде общих соображений. Вот некоторые из них:

Рассмотрение и изучение качественно-количественных и прикладных сторон явления должно вестись одновременно, в единстве. Обучение электрическим свойствам твердого тела невозможно проводить без привлечения некоторых общих положений механики, теплоты, оптики и атомной физики. Поэто-

му нецелесообразно делить курс физики на замкнутые разделы. Методические трудности, которые связаны с обучением электрическим свойствам твердого тела, в основном возникают в результате недостаточной разработки методики преподавания отдельных вопросов, а не от принципиальной невозможности их усвоения. Высокая эффективность в преподавании электрических свойств твердого тела, а также всей физики, достигается творческим подходом преподавателя ко всему учебному процессу.

Основная часть диссертации опубликована в следующих статьях:

1. Изучение общих закономерностей электрического тока в курсе физики X класса, IX научная конференция аспирантов НИИПН, тезисы докладов, Тбилиси, 1958 г.
2. Полупроводники и их изучение в школьном курсе физики, X научная конференция аспирантов НИИПН, тезисы докладов, Тбилиси, 1959 г.
3. Полупроводники и их изучение в школьном курсе физики, Журн. «Комунистури агзрдисатвис», № 2, 1960 г.
4. Некоторые вопросы изучения электрических свойств твердых тел, труды НИИПН Мин. Просв. ГССР, т. 14, Тбилиси, 1961 г.