

**РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ УМЕНИЙ  
СООТНЕСЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ  
В ОБУЧЕНИИ ФИЗИЧЕСКИМ ОСНОВАМ  
ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

*Раскрываются возможности предметного материала физических основ твердотельной электроники в плане формирования исследовательских умений соотнесения эксперимента, теории и практики как важного компонента исследовательско-ориентированного физического образования. Развиваются необходимые для этого методические подходы.*

*S. Khanin, I. Khinich*

**RESEARCH SKILLS DEVELOPMENT IN CORRELATION  
OF EXPERIMENT, THEORY AND PRACTICE  
IN SOLID-STATE ELECTRONICS PHYSICAL BASICS STUDYING**

*Capacity of subject material of solid-state electronics physical basics are discovered relating to research skills building up in correlation of experiment, theory and practice as an important component of research-oriented study of physics. Essential methodic approaches are developed.*

Овладение исследовательскими умениями соотнесения эксперимента, теории и практики является необходимым условием исследовательско-ориентированного обучения и должно реализовываться в активной познавательной деятельности студентов на предметном материале высокой научной и практической значимости, отражающем современные, признанные достижения науки и техники. В качестве такого предметного материала, безусловно, может выступать изучение физических основ твердотельной электроники [1, 2], методические подходы к обучению которым развиваются в настоящей работе. При условии взвешенного соче-

тания дедуктивного и индуктивного подходов к изучаемому материалу они призваны привести содержание и организацию познавательной деятельности в учебном процессе в соответствие с содержанием и структурой научной деятельности и раскрыть взаимосвязь в триаде эксперимент, теория и практика. Суть этих методических подходов раскрывается в следующих положениях.

1. Содержание лекций и физического практикума координировано таким образом, что составляет единое учебное исследование. Изучение теоретического материала предваряется самостоятельным установлением студентом на эксперименте ключевых фактов и их анализом.

2. Содержание теоретической части (курса лекций) строится как развивающаяся в связи с запросами со стороны эксперимента система моделей. Модельные представления теории изучаются в их становлении, столкновении с экспериментальными результатами, требующими своего объяснения и описания. Следствия, вытекающие из модельных представлений, подвергаются экспериментальной проверке.

3. Сопоставление теории и эксперимента осуществляется на основе конкретных результатов исследований и состоит в сравнении эксперимента и теории на качественном и на количественном уровне, включая оценку микроскопических параметров веществ.

4. Экспериментальная деятельность студентов направляется не только на проверку справедливости физической модели, но и там, где это возможно, на формирование новых представлений и понятий.

Проиллюстрируем предлагаемые методические подходы на примере изучения одной из центральных тем курса — «Электропроводность полупроводников» в части явления зонного переноса заряда в кристаллических полупроводниках в слабых электрических полях. При изучении этой темы до анализа состояния теории студентам предлагается выполнить ряд экспериментальных заданий. Первыми получаемыми ими данными являются характерные величины и активационный характер температурных зависимостей концентрации носителей заряда в полупроводниках и их проводимости, что качественно отличает неметаллическое состояние конденсированного вещества от металлического. На следующем шаге проводятся эксперименты по влиянию концентрации электрически активных примесей на температурную зависимость проводимости полупроводников в широком температурном диапазоне, которые обнаруживают явление перехода «полупроводник—металл» при достижении критической концентрации примесей (исчезает температурная зависимость концентрации носителей заряда в примесной области).

В ходе лекционного исследования перед студентами ставится задача построения модели этого выразительного явления. При этом центральным является вопрос, каким образом металлизация системы возникает при концентрации носителей заряда порядка  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , несоизмеримо ма-

лой по сравнению с концентрацией атомов в металле ( $\sim 10^{22}$  см<sup>-3</sup>). Для этого приходится осмыслить факторы, обуславливающие металлизацию системы. Фактором первого порядка здесь выступает степень перекрытия электронных орбиталей соседних атомов. Возможность достижения металлического состояния при определенной критической концентрации примеси объясняется на основе известных теоретических представлений об увеличении радиуса локализации примесного состояния в полупроводнике по сравнению со свободным атомом примеси. На этом основании формулируется и обосновывается гипотеза о применимости для объяснения изучаемого явления модели перехода из неметаллического состояния в металлическое типа перехода Мотта в неупорядоченной примесной системе [3].

Выразительным является и другое экспериментально наблюдаемое студентами явление — «обратный переход» сильно легированного полупроводника из металлического состояния в неметаллическое при увеличении степени компенсации основной легирующей примеси. Эти экспериментальные данные также обсуждаются в лекционном исследовании. В этом случае при построении модели андерсоновского перехода «металл—диэлектрик» студенты, направляемые преподавателем, оценивают масштаб флуктуаций потенциала случайного поля неупорядоченной системы заряженных примесных центров, анализируют перенос заряда в зависимости от положения уровня Ферми и его изменение с увеличением степени компенсации. На основе построенной электронной модели находит свое объяснение сам наблюдаемый переход, и в связи с пространственным разделением электронов и дырок делается прогноз о наличии в системе с крупномасштабными флуктуациями потенциала долговременной релаксации фотопроводимости, который проверяется студентами экспериментально.

Обсуждение уже этих первых примеров показывает, что развиваемые методические подходы к изучению физических свойств конденсированных веществ позволяют существенно повысить уровень активности познавательной деятельности студентов, сделать их участниками построения модельных представлений и научить использованию необходимых для их формирования и анализа экспериментальных и теоретических знаний.

Выразительным примером формирования новых для студентов представлений и понятий на основе экспериментального решения задач является освоение ими элементов теории протекания, при изучении которой обеспечивается возможность моделирования в учебном процессе всех основных компонентов научного исследования [4, 5]. Изучение теории протекания в курсе физики конденсированного состояния вещества позволяет устранить один из значительных разрывов между содержанием физики твердого тела как науки и ее содержанием в учебных курсах. В

последних электронная теория твердого тела традиционно ограничивается бoльцмановским переносом, описывающим свойства широкого круга классических материалов, в том числе кристаллических полупроводников и приборных систем на их основе. Вместе с тем, в современной физике твердого тела большое внимание уделяется и небольцмановским механизмам переноса заряда, что оставляет за занавесом для учащихся такие важные и хорошо разработанные в науке представления, как механизмы локализации носителей заряда, прыжковая электропроводность в структурно разупорядоченных и сильно неоднородных системах.

Как и в становлении самой теории, основным способом решения задач теории протекания в учебном процессе является компьютерное моделирование и вычислительный эксперимент. Так, в задаче связей студентами моделируется протекание в двухмерной конечной решетке, в которой случайное распределение целых или разорванных связей задает генератор случайных чисел. Если это число меньше заданного критического значения, то связь считается разорванной, если больше — целой.

Изменяя это критическое значение случайного числа, можно определить порог, при котором возникает кластер, соединяющий противоположные стороны решетки. Использование такого моделирования с необходимостью требует введения понятия порога протекания для систем, состоящих из различного числа элементов, позволяет визуализировать эффект протекания, изучать топологию кластеров в неупорядоченной системе и т. д. Разумеется, для моделируемой системы конечных размеров практически при любой величине критического значения случайного числа существует отличная от нуля вероятность образования кластера, соединяющего противоположные стороны решетки. Увеличивая размер решетки, студенты приходят к значению порога протекания, соответствующего бесконечной решетке и зависящего только от ее геометрии.

Аналогичным образом формируются понятия эффекта и порога протекания при экспериментальном решении других задач теории. Так, в задаче узлов исследуется возникновение кластера, соединяющего противоположные стороны решетки, в которой каждый узел может находиться в одном из двух состояний — быть целым или разрушенным. В третьей задаче — на случайных узлах — изучается связность узлов, распределенных в пространстве случайным образом. Два узла считаются связанными, если расстояние между ними меньше или равно некоторому заданному числу, называемому перколяционным радиусом. Студенты получают данные о величине перколяционного радиуса в зависимости от концентрации случайных узлов. В континуальной задаче теории протекания рассматривается «горная» система, описываемая случайной функцией  $V(x, y)$ , среднее значение которой равно нулю. Задается критическое число  $V_c$  такое, что области пространства, для которых  $V(x, y) < V_c$ , считаются «морем», а области пространства, для которых  $V(x, y) \geq V_c$ , — «су-

шей». При увеличении  $V_c$  изолированные первоначально «озера» сливаются друг с другом и образуют «океан». Требуется найти минимальное значение  $V_c$ , называемое уровнем протекания, при котором существует протекание по «водному пути».

Наряду с компьютерным моделированием теории протекания в учебный процесс разумно включить и проведение натурального эксперимента. В этом случае в качестве объекта исследования можно выбрать плёночные полимер-графитовые композиции. В таких образцах с увеличением температуры и влажности возрастает объёмная доля диэлектрической фазы, что связано с набуханием диэлектрика при возрастании влажности. Для проведения эксперимента берутся образцы с объёмной долей диэлектрической фазы вблизи критической, когда в системе ещё существует соединяющий проводящий кластер из графитовых частиц, но при незначительном увеличении доли диэлектрической фазы он разрушается. Студентам предлагается исследовать зависимость сопротивления данных образцов от температуры при постоянной относительной влажности. В этом случае при достижении критической температуры имеет место эффект порогового роста сопротивления, объясняемый увеличением объёмной доли диэлектрической фазы. Естественно, что с увеличением относительной влажности величина критической температуры уменьшается. Важно отметить, что наблюдаемый эффект протекания представляет практический интерес в плане создания позисторов на композиционных материалах.

Взаимосвязь эксперимента, теории и практики выразительно проявляется в современных признанных достижениях в области твердотельной электроники, среди которых в первую очередь нужно выделить работы авторов, удостоенных Нобелевской премии по физике. В содержании и методологии этих работ, которые, как правило, подробно освещаются в Нобелевских лекциях лауреатов, ясно видны, с одной стороны, практическое значение фундаментальных экспериментальных и теоретических исследований, а с другой стороны, — важная роль технологических достижений в развитии новых научных направлений, их влияние на дальнейшее развитие науки. Разумеется, при использовании материала Нобелевских лекций в учебном процессе, следует не только знакомить с содержанием этих лекций и сопряженных с ними материалов, но и вовлекать учащихся в исследовательскую деятельность, моделирующую реальный научный поиск в изучаемой области.

В качестве предметного материала при таком подходе может выступать физика и техника гетероструктур, достижения которой были удостоены в 2000 году Нобелевской премии по физике (Ж. И. Алферов, Г. Кремер) [6, 7]. Этот пример является показательным в рассматриваемом аспекте в силу ряда причин, в том числе роли и взаимосвязи экспериментальных и теоретических исследований в решении ответственных

физико-технических задач в области электроники; значения полученных результатов в разработке физики низкоразмерных систем; сопряженности с другими достижениями «нобелевского уровня». Важным является и востребованность при изучении этого вопроса практически всего объема знаний студентов в области физики полупроводников и, в первую очередь, овладения ее основой — умением построения зонных диаграмм и их использования для анализа электронных процессов.

С методической точки зрения, в обсуждаемой работе наибольший интерес имеет изучение физики и техники двойных гетероструктур как основы полупроводниковых инжекционных гетеролазеров. Перед студентами ставится ряд принципиальных вопросов в последовательности, отвечающей действительному ходу решения этой проблемы. Поставленные вопросы решаются в ходе лекционного исследования и самостоятельной работы студентов. На начальном этапе рассматривается возможность конструирования инжекционных лазеров на гомо-*p-n*-переходах. Для этого обсуждается условие достижения инверсной населенности, необходимое для получения лазерного эффекта в таких полупроводниковых структурах. Далее строится энергетическая диаграмма структуры *p-n*-перехода, и на её основе в диалоге со студентами выявляются существенные для работы инжекционных лазеров особенности. Среди них можно выделить наличие пороговой плотности тока, при которой коэффициент усиления становится достаточным для достижения лазерного эффекта. Из проведенного анализа следует, что в силу значительных оптических и электрических потерь инжекционные лазеры на гомо-*p-n*-переходах могут работать лишь в импульсном режиме и при низких температурах.

На следующем этапе раскрывается концепция конструирования инжекционного лазера на основе двойной гетероструктуры и проводится сопоставление характеристик лазерных структур на гомо- и гетеропереходах. В первую очередь студентам предлагается построить зонную диаграмму  $N - p - P^+$  гетероструктуры при прямом смещении, анализ которой позволяет прогнозировать существование ряда важнейших эффектов, определяющих широкое применение двойных гетероструктур в оптоэлектронике. Во-первых, это эффект широкозонного окна; во-вторых, существенно большая эффективность инжектора в структурах на основе гетеро-*p-n*-переходов по сравнению с гомо-*p-n*-переходами, что очень важно для полупроводниковых лазеров; в-третьих, эффект электронного ограничения: так, существующий на гетерогранице  $p - P^+$  потенциальный барьер в зоне проводимости препятствует сквозному транспорту электронов, запирая их в пределах узкозонной области. Наконец, рассматривается еще одно важное свойство гетероструктуры — эффект оптического ограничения, который состоит в том, что активный узкозонный слой ведет себя как волновод, локализуя излучение, распростра-

няющееся в плоскости *p-n*-перехода, за счет внутреннего отражения на обеих гетерограницах [6].

Суммируя сказанное, приходим к выводу о наличии у двойных гетероструктур ряда принципиальных преимуществ: благоприятных условий для получения в активном узкозонном слое инверсной населенности, локализации и совмещения в нем электронного и светового потоков. Это находит свое проявление в существенном снижении уровня пороговой плотности тока и возможности создания на основе двойных гетероструктур инжекционных лазеров, работающих в непрерывном режиме при комнатных температурах. Можно подчеркнуть, что в развитии физики двойных гетероструктур на ее начальном этапе теория опережала еще не осуществимый в силу отсутствия соответствующих структур эксперимент, проявляя свою прогностическую функцию.

Важно отметить, что данный предложенный материал дает возможность студентам совместно с преподавателем конструировать двойные гетероструктуры (их зонные диаграммы) с необходимыми электронными свойствами, а затем — проверять результаты инженерии электронных спектров на эксперименте.

Следующий этап изучения вопроса состоит в анализе еще одного аспекта проблемы — роли достижений технологии в развитии физики и техники гетероструктур. Здесь показывается, что только прорыв в технологии получения гетероструктур, произошедший с появлением молекулярно-лучевой эпитаксии и вслед за ней газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений, дал возможность получения широкого круга конструируемых гетероструктур. Более того, он предопределил и развитие нового научного направления — физики низкоразмерных систем. В указанном аспекте рассматриваются лазерные гетероструктуры с раздельным электронным и оптическим ограничением, содержащие в активной области квантово-размерные наноструктуры — квантовые ямы и точки, открывшие возможности дальнейшего уменьшения пороговой плотности тока.

Взаимосвязь эксперимента, теории и практики хорошо прослеживается в физике гетероструктур со сверхрешетками. Протекание тока в такой структуре определяется туннелированием носителей заряда через потенциальные барьеры, разделяющие ямы, причем под действием электрического поля основное состояние одной ямы может совпадать с возбужденным состоянием другой ямы, что приводит в результате туннелирования между этими состояниями к индуцированному излучению. Эти результаты стимулировали экспериментальные исследования, которые привели к реализации лазерного эффекта и, в конечном счете, к созданию униполярных лазеров, работающих в среднем ИК-диапазоне.

Возможности приобретения студентами опыта соотнесения эксперимента, теории и практики в целостной исследовательской деятельности

в полной мере открывает лабораторный практикум, построенный как цикл взаимосвязанных учебно-исследовательских заданий, ориентированный на разностороннее изучение физики определенного, значимого для науки и практики класса объектов и анализ возможностей практического использования полученных знаний. В отличие от традиционной организации практикума, когда он строится из отдельных, относящихся к разным объектам работ, вследствие чего подготовка студентов к их выполнению имеет отрывочный и ограниченный характер, предлагаемое построение практикума открывает возможности систематического, углубленного изучения физики выбранного класса объектов.

Выполнение студентами предлагаемого практикума дает больший по сравнению с традиционным практикумом опыт сопоставления эксперимента и теории, формулирования на его основе адекватных изучаемым явлениям значимых выводов. Это связано с несколькими обстоятельствами. Во-первых, — с необходимостью объяснения и описания различных физических явлений с позиций единых модельных представлений (объект один). Во-вторых, с возможностью определения параметров изучаемых веществ из независимых экспериментов, что повышает достоверность и обоснованность делаемых выводов. В-третьих, с перспективой реализации прогностической функции теории, экспериментальной проверки ее предсказаний. Наконец, с возможностью создания условий не только приобретения учащимися новых знаний, но и их использования в решении прикладных задач.

Конечно, такой практикум должен строиться на благодатном для овладения методологией научной деятельности и отвечающем реальной ситуации в ней материале, допускающем неоднозначные подходы, оценки и толкования. В основу выбора проблематики практикума должен быть положен ряд принципов, к основным из которых относятся: актуализация, новизна содержания, представительность в методологическом плане, возможность реализации в условиях вузовской лаборатории. Некоторые примеры практического воплощения этой идеи [8, 9] приведены в литературе.

В этой связи рассмотрим исследовательский практикум по изучению физики аморфных оксидов переходных металлов в тонких анодных слоях. Выбор этого класса объектов обусловлен несколькими причинами. Во-первых, их свойства представляют значительный научный интерес в связи с принадлежностью этих материалов к интенсивно исследуемым неупорядоченным системам и практический интерес в связи с использованием в качестве диэлектрика конденсаторов и других электронных устройств. Во-вторых, анализ физических явлений в этих материалах с необходимостью требует освоения студентами новых для них знаний относительно электронных и ионных процессов в конденсированных веществах, отвечающих современному состоянию науки. В-третьих, анодные оксиды



металлов допускают возможность сравнительно простого управления их составом и структурой, что позволяет установить корреляцию свойств изучаемых материалов с их строением. В-четвертых, в условиях вузовской лаборатории возможна постановка полного цикла исследований: от получения анодного оксида до экспериментальной проверки следствий, вытекающих из развитых модельных представлений.

Предлагаемый практикум состоит из пяти учебно-исследовательских заданий, в которых анализируются закономерности кинетики формирования анодного оксида на поверхности металла в различных электрических режимах; в этих оксидах изучаются неомическая электронная проводимость на постоянном токе в сильных электрических полях и частотная зависимость проводимости на переменном токе; исследуются нестационарные явления при неоднородном оптическом возбуждении и влияние кинетики формирования оксида на его свойства.

Исследовательские умения соотнесения эксперимента, теории и практики оказываются здесь востребованными на уровне выполнения отдельных заданий и практикума в целом в связи с необходимостью: построения моделей различных наблюдаемых явлений; детального, разностороннего сопоставления эксперимента и теории; разработки научно обоснованных подходов к решению задач анализа; диагностики и управления свойствами изучаемых материалов. Так, совокупность получаемых в практикуме экспериментальных результатов, относящихся к электронным свойствам анодных оксидов в различных и широко изменяющихся внешних условиях, описывается с единых позиций теории прыжкового переноса в неупорядоченных системах с сильной локализацией носителей заряда. С использованием этой модели из независимых экспериментов получают сходящиеся оценки концентрации локализованных состояний; разрабатывается экспериментальная методика определения сильной электрон-фононной связи на основе анализа особенностей поведения неомической прыжковой проводимости в сильных электрических полях; формулируются и экспериментально проверяются практические рекомендации по расширению диапазона рабочих напряжений оксидных конденсаторов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ханин С. Д., Хинич И. И. Физические основы курса электроники в педагогическом вузе // Физическое образование в вузах. 2004. Т. 10. № 4. С. 106–114.
2. Ханин С. Д., Хинич И. И. Методические подходы к изучению физических основ электроники в педагогическом вузе // Физическое образование в вузах. 2004. Т. 10. № 4. С. 115–124.
3. Мотт Н. Переходы металл—изолятор. М., 1979.
4. Виолин Э. Е., Виолина Г. Н., Копылов А. А., Марасина Л. М., Ханин С. Д. Статистика электронов и кинетических явлений в твердых телах: Учебное пособие. СПб., 1993.

## Развитие исследовательских умений соотнесения эксперимента, теории и практики...

---

5. Гулд Х., Тобочник Я. Компьютерное моделирование в физике. В 2-х ч. М., 1990.

6. Алфёров Ж. И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии (Нобелевские лекции по физике — 2000) // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 9. С. 1068–1086.

7. Крёмер Г. Квазиэлектрическое поле и разрывы зон. Обучение электронов новым фокусам (Нобелевские лекции по физике — 2000) // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 9. С. 1087–1101.

8. Хинич И. И., Цуревский Е. В. Изучение физики материалов и компонентов твердотельной электроники в педагогическом вузе // Физическое образование в вузах. 2006. Т. 12. № 3. С. 77–85.

9. Пронин В. П., Хинич И. И. Исследование поверхности твердого тела в специальном физическом практикуме // Труды IX Международной учебно-методической конференции «Современный физический практикум». Волгоград, 19–21 сентября 2006. М., 2006. С. 146–147.