

УДК 378.147

## Практико-ориентированный подход при изучении физики твердого тела

**Доронин Вячеслав Александрович**

Кандидат физико-математических наук,  
преподаватель кафедры физики,  
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,  
197198, Российская федерация, Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13,  
e-mail: doroninslava@rambler.ru

**Щедровский Александр Анатольевич**

Преподаватель кафедры физики,  
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,  
197198, Российская федерация, Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13,  
e-mail: doroninslava@rambler.ru

### Аннотация

В статье продемонстрированы возможности применения практико-ориентированного подхода в инженерном образовании при изучении электроники твердого тела. Современная электроника – это нанoeлектроника, фундаментальной основой которой выступает физика наноструктур. Выделены цель, задачи, научная новизна данного практико-ориентированного обучения. Установлены методические, мотивационные и развивающие ресурсы содержания предметного материала физики наноструктур при подготовке инженеров политехнических вузов. В работе представлен методический подход освоения содержания фундаментального предметного материала в области нанoeлектроники путем решения циклов прикладных учебно-исследовательских задач. При решении таких задач обучающимся может быть продемонстрирована нелинейность методологии современных научных исследований в области физики наноструктур. Пр продемонстрирован опыт получения знаний в заявленной области не в готовом виде, а путем решения проблемных задач, отличительной особенностью которых является моделирование научно-исследовательской работы во всех её компонентах организации деятельности.

### Для цитирования в научных исследованиях

Доронин В.А., Щедровский А.А. Практико-ориентированный подход при изучении физики твердого тела // Педагогический журнал. 2024. Т. 14. № 6А. С. 378-391.

### Ключевые слова

Профессионально-значимые компетенции будущих инженеров, современные стратегии развития высшего образования в России, физика наноструктур, практико-ориентированный подход, инженерное образование.

## Введение

Предметное освоение проблематики современных научно-технических достижений, изучение направлений развития современных высоких технологий является вызовом времени, относящемся к инженерному образованию [Александров, Федоров, Медведев, 2013, 4]. Выпускники политехнических вузов должны обладать адекватными представлениями о современных научно-технических достижениях, иметь знания об физических принципах работы устройств твердотельной наноэлектроники, выступающей в качестве объекта изучения физики наноструктур. Данная область научного знания изучает вещество и технические устройства в нанометровом диапазоне, а также процессы протекающие в таких объектах [Садыкова, Холин, 2023, 425].

Система высшего профессионального образования осуществляет подготовку специалистов опираясь на Федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) высшего образования, в которых прописаны профессионально-значимые компетенции, которыми должны обладать будущие инженеры. Подготовка таких специалистов в соответствии с ФГОС, владеющих необходимыми для успешной профессиональной деятельности компетенциями, должна иметь деятельностную направленность. В этой связи встает задача разработки методических подходов, направленных на практическое освоение содержания предметного материала современных достижений науки и техники, адекватных целям такой подготовки.

В настоящей статье представлены возможности деятельностного изучения фундаментальных основ предметного материала физики наноструктур с помощью *задачного подхода*. Такой подход в процессе подготовки будущих инженеров предполагает структурирование изучаемого предметного материала таким образом, при котором обучающиеся получают информацию не в виде готового знания, а путем самостоятельного решения проблемных учебно-исследовательских задач.

Как отмечал основоположник отечественной психологии Сергей Леонидович Рубинштейн - одной из значимых форм проявления интеллекта является мыслительный процесс [Рубинштейн, 2024, 15]. В этой связи следует отметить, что организация поисково-познавательной деятельности обучающихся при решении проблемных по своему характеру учебно-исследовательских задач приводит к существенному развитию составляющих основу интеллекта мыслительных операций: обобщения; анализа; синтеза; абстрагирования; сравнения.

При построении проблемных задач в качестве основы был отобран предметный материал физики наноструктур, который обладает высокой практической значимостью при изучении свойств наноматериалов, а также понимания принципов и режимов работы приборов наноэлектроники.

Задания сформулированы для обучающихся таким образом, что предусматривают аналитическое решение проблемной задачи, и проверку полученных теоретических выводов на основе результатов эксперимента.

Учебно-исследовательские задачи группируются в циклы задач, что позволяет системно изучать как фундаментальные физические эффекты, наблюдаемые в наноструктурах, так и получать базовые знания о современных достижениях в области науки и техники. Такие учебные проблемные задачи, направленные на деятельностное освоение нового предметного материала, могут быть использованы в рамках традиционных разделов общего курса физики: “Квантовая механика”, “Физика твердого тела”, “Статистическая физика”, а также в

специальных дисциплинах.

*Актуальность* настоящего исследования продиктована:

- противоречиями, обусловленными необходимостью подготовки будущих инженеров в рассматриваемой предметной области и отсутствием разработанных методических подходов к освоению её содержания;
- противоречиями, связанными с необходимостью придания процессу подготовки обучающихся практической направленности и преимущественно информационным характером такой подготовки.

*Целью* исследования выступало концептуальное обоснование отбора и содержания предметного материала, выбор форм организации деятельности при его освоении.

Для достижения целей исследования были поставлены следующие *задачи*:

- разработать подходы, которые позволят будущим инженерам освоить физику современных направлений научно-технического развития;
- сформировать у обучающихся общепрофессиональные компетенции, такие как умения осмысленно применять полученные фундаментальные знания в практической инженерной деятельности;
- проверить эффективность предлагаемых методических подходов, используемых в процессе подготовки молодых специалистов.

*Научная новизна* настоящей статьи состоит в следующем. Во-первых, в статье отражены особенности процесса подготовки инженеров в области физики наноматериалов и наноструктур, к которым относятся: в содержательном аспекте – значимость фундаментальных основ, а в процессуальном аспекте – приоритет приобретения компетенций, необходимых для будущей профессиональной деятельности. Во-вторых, развит подход к построению содержания и организации деятельности обучения будущих инженеров в проблемном поле физики наноструктур соответствующий методологии научно-технической деятельности в её теоретической и экспериментальной формах. В-третьих, показан образовательный потенциал предметного материала физики наноструктур при подготовке будущих инженеров.

*Практическая значимость* настоящего исследования определена тем, что предложенные в работе методические подходы к обучению выступают в качестве основы для подготовки будущих инженеров, имеющих представление о принципах работы современных приборов нанoeлектроники.

## Методология

Возможности освоения обучающимися нового предметного материала в рамках задачного подхода рассмотрим на примере построения цикла проблемных задач, направленного на изучение эффектов размерного квантования энергетического спектра электронов (квантово-размерный эффект), наблюдаемых в системах пониженной размерности. Системами пониженной размерности (низкоразмерные системы или наноструктуры) называются такие материалы, будь то естественные или искусственные, в которых движение носителей заряда ограничено размерами этих структур хотя бы в одном из трех направлений. В то же время размер таких наноструктур должен быть сопоставим с такими параметрами физики конденсированного состояния как: боровским радиусом экситона в низкоразмерных системах; боровским радиусом примесного центра в таких структурах; длиной волны де-Бройля для электронов. В свою очередь под понятием “размерный эффект” здесь подразумевается

зависимость физических свойств таких структур от их геометрических размеров [Гасумянц, 2010, 264].

Основной эффект, который проявляется в наноструктурах при выполнении условия ограничения движения носителей заряда их размерами, сравнимыми с длиной волны де-Бройля для электрона в таких структурах – это изменение энергетического спектра электрона с квазинепрерывного, присущего макроскопически большим материалам, до дискретного, наблюдаемого в отдельных атомах. Данный эффект перестройки энергетического спектра электронов в таких материалах по сравнению со спектром в трехмерных кристаллах и принято называть квантово-размерный эффект.

Рассмотрим первую задачу авторского учебного цикла задач, целью которой является формирование у обучающихся предметных знаний о размерном квантовании энергетического спектра электрона в квантовых ямах (двумерных системах пониженной размерности). Квантовой ямой называют тонкий слой полупроводника, в котором движение электрона ограничено в одном направлении.

Данная задача для обучающихся на практических занятиях формулируется следующим образом. *В рамках квантово-механической модели “электрон в потенциальном ящике” проанализируйте, при каком размере ящика энергетическое расстояние между соседними уровнями энергии электрона будет сопоставимо с тепловой энергией  $kT$  при комнатной температуре.*

Для решения данной проблемной задачи на практическом занятии привлекается квантово-механическая модель для электрона, находящегося в одномерном потенциальном ящике. В процессе решения обучающиеся получают выражение для волновой функции электрона в потенциальном ящике, а также выражение, определяющее энергетическое расстояние между двумя соседними уровнями энергии электрона в потенциальном ящике:

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = \frac{\hbar^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot m \cdot a^2} (2n + 1), \quad (1)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $n$ -номер уровня энергии электрона в потенциальном ящике,  $m$  – масса электрона,  $a$  – ширина потенциального ящика.

В курсе квантовой механики рассматривается обычно макроскопически большие размеры потенциального ящика. При дальнейшем анализе представленной модели применительно уже к двумерным системам обучающиеся рассчитывают энергетическое расстояние  $\Delta E$  для электрона в них. Расчеты проводимые обучающимися на практическом занятии показывают, что тепловая энергия  $kT$  при комнатной температуре оказывается меньше энергетического расстояния  $\Delta E$  при ширине квантовой ямы, меньшей величины 100 нм. Данное расстояние в науке выступает в качестве границы нанодиапазона.

При выполнении данного условия квантовые переходы электрона между состояниями становятся маловероятными, а энергетический спектр в данном направлении оказывается дискретным.

При решении данной задачи на практических занятиях обучающиеся осваивают фундаментальный в физике наноструктур квантово-размерный эффект, имеющий важное прикладное значение в приборах нанoeлектроники. В квантовых ямах он проявляется в том, что при ограничении движения носителей заряда стенками квантовой ямы в направлении

перпендикулярном стенкам, спектр электрона становится дискретным. После решения представленной задачи обучающиеся делают вывод о том, что электрон в квантовых ямах имеет анизотропный дискретно-непрерывный энергетический спектр. В направлении размерного квантования (перпендикулярно стенкам квантовой ямы) наблюдается дискретный характер энергетического спектра электрона, в то время как в двух других ортогональных направлениях спектр остается квазинепрерывным.

Если учесть тот факт, что движение электрона в кристаллических материалах определяется его эффективной массой  $m^*$ , представляется возможным установить закон дисперсии энергии электрона в двумерных системах:

$$E = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m^*} + \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* a^2}, \quad (2)$$

где  $m^*$  – эффективная масса электрона в квантовой яме;  $k_x, k_y$  – волновые вектора электронов в направлении его свободного движения (вдоль осей  $x$  и  $y$ ),  $a$  – ширина квантовой ямы.

Как видно из выражения, электроны, принадлежащие к одному уровню с постоянным значением  $n$ , могут иметь любую энергию от  $E_n$  до бесконечности. Таким образом, при анализе полученного закона дисперсии обучающиеся осваивают одно из важных понятий физики наноматериалов и наноструктур – подзона размерного квантования [Джардималиева, Кыдралиева, Метелица, 2021, 98].

Для проверки результатов, полученных в процессе решения задачи, можно провести эксперимент, в котором обучающиеся изучают спектральную зависимость коэффициента оптического поглощения трехмерных макроскопических полупроводников и наноструктур. В качестве объектов исследования здесь можно использовать макроскопического размера кристалл арсенида галлия GaAs и двойную гетероструктуру, состоящую из квантовой ямы, образованной арсенидом галлия GaAs, ограниченной двумя широкозонными полупроводниками Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As. Данные гетероструктуры сегодня широко применяются в инжекционных полупроводниковых лазерах [Жуков, 2007, 150]. Возможно построить работу обучающихся таким образом, когда проводится такое исследование для нескольких гетероструктур, имеющих различную ширину активной области. При этом обучающимся демонстрируется взаимосвязь фундаментальной и прикладной науки, когда функциональными свойствами прикладных разработок физики наноструктур можно управлять на основе фундаментальных знаний.

Следующая задача учебного цикла направлена на освоение эффекта размерного квантования носителей заряда в квантовых нитях (одномерные системы пониженной размерности). Проблемная учебно-исследовательская задача может быть сформулирована следующим образом: *аналитически получите закон дисперсии энергетического спектра электрона, находящегося в квантовой нити, и подтвердите экспериментально полученные выводы.*

В квантовых нитях ограничение движения электрона происходит в двух ортогональных направлениях. В ходе решения этой задачи обучающиеся рассматривают квантово-механическую модель электрона, находящегося в потенциальном ящике. В данном ящике потенциальная энергия электрона устанавливается зависящей от ортогональных координат  $x$  и  $y$ . В результате анализа данной модели обучающиеся приходят к следующему выводу – размерное квантование энергии электрона в квантовых нитях происходит уже в двух

ортогональных направлениях (перпендикулярно оси квантовой нити). При этом вдоль оси квантовой нити спектр электрона остается квазинепрерывным. Формула, описывающая закон дисперсии спектра электрона в указанных структурах, имеет следующий вид:

$$E = \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m^*} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left( \frac{n_1^2}{a_1^2} + \frac{n_2^2}{a_2^2} \right), \quad (3)$$

где  $k_z$ , - волновой вектор электрона, движущегося в направлении оси квантовой нити,  $n_1$  и  $n_2$  – целые числа, определяющие уровень энергии электрона в направлениях перпендикулярных оси квантовой нити,  $a_1, a_2$  – размеры квантовой нити в направлениях перпендикулярных оси нити.

Следовательно, энергетический спектр одномерных систем демонстрирует дискретно-непрерывную природу, подобную спектру двумерных систем. Однако квазинепрерывность спектра носителей заряда здесь проявляется только в одном направлении [Гасумянц, 2010, 120]. Экспериментальным подтверждением полученных обучающимися в ходе решения проблемной задачи выводов могут служить кривые, отражающие спектральные зависимости коэффициента оптического поглощения гетероструктур, содержащих квантовые нити.

При решении аналогичной учебно-исследовательской задачи для квантовых точек обучающиеся и в этом случае получают закон дисперсии энергии электрона. Полученное при этом выражение отражает предельный случай квантования спектра электрона в наноструктурах: спектр здесь становится полностью дискретным, аналогичным спектру атома. В этом случае для квантовых точек закон дисперсии записывается обучающимися в следующем виде:

$$E = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left( \frac{n_1^2}{a_1^2} + \frac{n_2^2}{a_2^2} + \frac{n_3^2}{a_3^2} \right), \quad (4)$$

где  $n_1, n_2, n_3$  – целые числа, которые указывают на номер энергетического уровня электрона в квантовой точке в ортогональных осях  $x, y, z$  соответственно,  $a_1, a_2, a_3$  – размеры квантовой точки.

Как и в случае рассмотренных ранее проблемных задач, полученный аналитический результат подтверждается в ходе эксперимента. Решение задачи здесь дополняется практическим заданием по анализу графиков, отражающих спектральные зависимости коэффициента оптического поглощения стекол, с диспергированными в них квантовыми точками.

Задачный подход может быть применен и при изучении энергетического спектра электронных состояний в сверхрешетках, состоящих из чередующихся в одном направлении слоев полупроводников с различной шириной запрещенной зоны. Это в свою очередь приводит к образованию чередующихся квантовых потенциальных ям и барьеров (барьеры образованы слоями широкозонного полупроводника). Здесь при формулировании для обучающихся проблемной учебно-исследовательской задачи применяется методический прием – в решении используется хрестоматийная квантово-механическая модель Кронига–Пенни. Учебно-исследовательская задача при этом формулируется следующим образом: *в рамках квантово-механической модели Кронига–Пенни сравните энергетический спектр электронов в*

*сверхрешетках со спектром электронов в кристалле.*

При решении проблемной задачи обучающиеся получают закон дисперсии для спектра электронов в сверхрешетках:

$$E = E_n + (-1)^n \frac{\Delta_n}{2} \cos(kd), \quad (5)$$

где  $\Delta_n$  – туннельный интеграл, определяющий ширину энергетических зон сверхрешетки, и зависящий от ширины барьеров,  $E_n$  – энергетический спектр отдельно взятой квантовой ямы,  $d$  – период сверхрешетки,  $k$  – компонента волнового вектора, соответствующая свободному движению электрона.

При анализе полученного выражения для закона дисперсии энергетического спектра сверхрешеток в зависимости от ширины квантовых потенциальных ям и барьеров обучающиеся приходят к пониманию того, что данный спектр сверхрешеток подобен энергетическому спектру кристаллов, но отличается по ширине энергетических зон. Решая данную проблемную учебно-исследовательскую задачу обучающиеся осваивают прикладное значение приобретенных фундаментальных знаний, состоящее в том, что параметрами энергетического спектра сверхрешеток можно управлять, изменяя ширину их потенциальных ям и барьеров: ширина минизон может варьироваться от ширины энергетических зон, присущих объемному кристаллу (при малых размерах барьеров), до дискретных энергетических уровней (при барьерах, являющихся туннельно-непрозрачными) [Колесников, Никоноров, 2013, 19]. Моделирование зонной структуры сверхрешеток позволяет в широком диапазоне управлять длиной волны излучения квантово-каскадных лазеров, работающих на их основе. В то же время, применение сверхрешеток в квантово-каскадных лазерах позволяет существенным образом увеличить мощность выходного излучения в них, по сравнению с полупроводниковыми лазерами, работающими на гомопереходах.

Полученные обучающимися в ходе аналитического решения задачи результаты могут быть подтверждены в ходе решения исследовательского задания. Здесь обучающимся предлагается провести сравнительный анализ спектральной зависимости коэффициента оптического поглощения трехмерного полупроводника GaAs и сверхрешетки  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$  по полученным экспериментальным кривым.

Применение *задачного подхода* при подготовке инженеров политехнических вузов в области физики наноструктур дает возможность обучающимся овладеть современными методами поисково-познавательной деятельности, в ходе чего они приобретают профессионально-значимые компетенции, к числу которых относятся следующие:

- умения описывать функциональные свойства изучаемых структур, имеющие важное значение для их практического применения;
- умения анализировать свойства изучаемых структур в зависимости от внешних условий;
- умения идентификации физических процессов ответственных за свойства изучаемых структур;
- умения проводить конструкторскую работу на основе приобретенных фундаментальных знаний.

Предметный материал физики наноструктур обладает значимыми *методологическими*

*ресурсами* [Ларченкова, 2014, 20] при его освоении в рамках рассматриваемого задачного подхода. Это обусловлено тем фактом, что обучающиеся при решении проблемных учебно-исследовательских задач осваивают особенности методологии научно-технической деятельности инженера, проявляющейся во взаимосвязи фундаментальных знаний и технологических разработок. Данная взаимосвязь в методологии наблюдается как для фундаментальных знаний, которые выступают как основа технологических разработок, так и для видов деятельности, когда прикладные и фундаментальные исследования проводятся с помощью одних и тех же методов.

Применение на практических и внеаудиторных занятиях проблемных учебно-исследовательских задач способствует раскрытию *мотивационных ресурсов* содержания предметного материала физики наноструктур. Это представлено в том, что проблематика данной области отвечает всем стимулам развития у обучающихся познавательного интереса: актуальности осваиваемого обучающимися предметного материала, а также его новизне, изучения освоенного предметного материала под новым углом зрения.

Организация процесса подготовки инженеров путем использования проблемных задач на практических занятиях раскрывает *научные ресурсы* содержания предметного материала физики наноструктур. Освоение содержания данной области знаний способствует сокращению существующего сегодня отставания между содержанием физики как науки и физики как учебной дисциплины.

Применение рассматриваемого в статье методического подхода обеспечивает раскрытие и *развивающих ресурсов* содержания предметного материала физики наноструктур. Решение проблемных задач в этой связи способствует развитию умений самообучения у обучающихся. Здесь обучающиеся смогут овладеть универсальными компетенциями:

- смыслового видения проблемы исследования;
- обоснованного целеполагания;
- соотнесения приобретенных знаний с практикой;
- планирования и организации деятельности;
- критически-рефлексивного анализа деятельности.

Наряду с этим хотелось бы отметить, что решение проблемных задач в предметной области современной нанoeлектроники способствует развитию важных для инженера качеств мышления и организации профессиональной деятельности: критичность, систематичность, целенаправленность, конструктивность.

Рассмотрим проблемную учебно-исследовательскую задачу следующего учебного цикла, направленного на изучение режимов работы современных приборов твердотельной микро- и нанoeлектроники: полевых транзисторов, работающих на основе гомопереходов; транзисторов, работающих на основе гетеропереходов с модулированным легированием; резонансно-туннельных транзисторов. Рассматриваемая задача посвящена изучению эффектов размерного квантования, наблюдаемых в полевых транзисторах. В таких приборах вследствие эффекта поля образуется квантовая потенциальная яма треугольной формы для электронов на границе полупроводник – оксид, расположенная внутри полупроводника близко к оксидному слою. Здесь возникает так называемый инверсионный канал полевого металл-оксид-полупроводник транзистора (МОП-транзистор), в котором находится двумерный электронный газ (ДЭГ) [Зебрев, 2011, 98].

Задача, направленная на изучение эффекта размерного квантования для двумерного

электронного газа в МОП-транзисторах для обучающихся формулируется следующим образом. *Проанализируйте, от каких физических параметров зависит концентрация ДЭГ, возникающего в индуцированном канале кремниевого МОП-транзистора.*

Решая данную проблемную задачу обучающиеся должны владеть знаниями в области статистической физики и квантовой механики. Для определения концентрации носителей заряда в полупроводниках любого рода необходимо знать выражение для функции Ферми-Дирака  $f(E)$ , определяющей вероятность заполнения электроном энергетических состояний, а также выражение для плотности электронных состояний  $g(E)$  в данном полупроводнике. Концентрация носителей заряда может быть найдена путем нахождения интеграла следующего вида:

$$n = \int_0^{\infty} f(E) g(E) dE \quad (6)$$

Функция плотности электронных состояний для двумерного электронного газа в МОП-транзисторе также может быть получена самостоятельно обучающимися и принимает следующий вид:

$$g(E)_{2D} = \frac{m^*}{\pi \hbar^2}, \quad (7)$$

где  $\hbar$  - постоянная Планка,  $m^*$  - эффективная масса электрона в индуцированном канале полевого транзистора.

Плотность состояний энергии электрона в квантовых ямах, нитях и точках существенным образом отличается, что влияет прежде всего на проводимость таких наноструктур.

Затем обучающиеся самостоятельно решают интеграл и получают выражение для концентрации электронов ДЭГ в подзоне размерного квантования кремниевого полевого транзистора:

$$\begin{aligned} n_{2D} &= \frac{m^*}{\pi \hbar^2} \int_{E_n}^{\infty} \frac{1}{1 + e^{\frac{E-\mu}{kT}}} dE = \left| \frac{E-\mu}{kT} = x \right| = \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \int_{E_n}^{\infty} \frac{1}{(1 + e^x)} dx = \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \int_{E_n}^{\infty} \frac{e^{-x}}{e^{-x} + e^{-x} e^x} dx = \\ &= \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \int_{E_n}^{\infty} \frac{e^{-x}}{1 + e^{-x}} dx = \left| \begin{array}{l} 1 + e^{-x} = U \\ e^{-x} dx = -dU \end{array} \right| = -\frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \int_{E_n}^{\infty} \frac{1}{U} dU = \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} (-\ln U) \Big|_{E_n}^{\infty} = \\ &= \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} (-\ln(1 + e^{-x})) \Big|_{E_n}^{\infty} = \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \left( -\ln(1 + e^{\frac{E_n - \mu}{kT}}) \right) \Big|_{E_n}^{\infty} = \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \ln(1 + e^{\frac{\mu - E_n}{kT}}). \end{aligned}$$

Результатом решения задачи для обучающихся выступает получение выражения общей концентрации электронного газа в канале полевого транзистора. Здесь обучающиеся проводят анализ выражения на предмет того, как меняется концентрация в зависимости от ряда

параметров: температуры, энергии электрона и его эффективной массы, химического потенциала полупроводника.

В результате обучающиеся самостоятельно определяют выражение для общей концентрации ДЭГ в канале полевого транзистора по всем подзонам квантования:

$$n_{2D} = \frac{m^* kT}{\pi \hbar^2} \ln \left( 1 + e^{\frac{\mu - E_n}{kT}} \right) = N_c \sum_{n=0}^{\infty} \ln \left( 1 + e^{\frac{\mu - E_n}{kT}} \right), \quad (8)$$

где  $E_n$  - уровень энергии электрона, соответствующий дну  $n$ -ой подзоны,  $N_c$  - число состояний в интервале энергии  $kT$ ,  $\mu$  - химический потенциал материала подложки транзистора.

В дальнейшем на занятии обучающимся предлагается провести оценку полученного выражения на предмет того, в каком диапазоне изменяется концентрация ДЭГ в первой подзоне размерного квантования. На основе этого обучающиеся делают вывод о проводимости индуцированного канала полевого транзистора.

Решая подобные проблемные учебно-исследовательские задачи обучающиеся приобретают фундаментальные знания, и получают опыт применения этих знаний для описания функциональных свойств современных приборов микро- и нанoeлектроники.

## Результаты

В ходе организации образовательного процесса была проведена оценка эффективности предлагаемого методического подхода. Проводился анализ относительного количества обучающихся, проявивших определенный уровень готовности (высокий, средний, низкий) применять полученные знания по каждому из соответствующих критериев оценки. Уровень обучающегося определялся на основе результатов, полученных в контрольных точках (контрольных срезах). Временное расстояние между срезами составляло один месяц. Работа велась с обучающимися второго курса на протяжении года.

В качестве метода анализа уровня готовности будущих специалистов применять накопленные знания выступало наблюдение преподавателем за решением обучающимися проблемных задач на практических, семинарских и факультативных занятиях.

Критериями, по которым проводилась оценка уровня готовности выступали умения к применению накопленных знаний при:

- качественном и количественном объяснении эффектов, которые наблюдаются в анализируемых наноструктурах;
- оценке применимости используемых модельных представлений;
- выборе метода экспериментального исследования отобранных образцов и проведении первоначального качественного анализа полученных данных;
- критической оценке сделанных выводов.

Уровень готовности оценивался как высокий, если обучающиеся проявляли умения к конструктивному, логически завершеному решению предложенных заданий в области физики наноструктур на основе приобретенных фундаментальных знаний.

При среднем уровне готовности обучающиеся проявляли способности только к частичному использованию фундаментальных знаний для решения прикладных задач изученного типа.

Низкий уровень готовности соответствовал отсутствию у обучающихся указанных способностей.

В таблице №1 представлена динамика изменения уровней готовности обучающихся к применению фундаментальных знаний. Относительное количество обучающихся, проявивших соответствующий уровень, и прошедших подготовку с применением разработанного научно-методического обеспечения на втором курсе специалитета, определялось по отношению к общему количеству обучающихся ( $N=200$ ), прошедших такую подготовку.

**Таблица 1 - Динамика изменения уровней готовности обучающихся к применению фундаментальных знаний**

Уровень готовности к применению фундаментальных знаний	Относительное количество обучающихся, проявивших указанный уровень, % (общее количество обучающихся $N=200$ )			
	Контрольная точка №1	Контрольная точка №2	Контрольная точка №3	Контрольная точка №4
Высокий уровень	19.3	23.7	27.8	33.2
Средний уровень	36.4	41.2	47.5	54.9
Низкий уровень	44.3	35.1	24.7	11.9

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение предлагаемого в работе методического подхода решения проблемных задач способствует увеличению относительного количества обучающихся, проявляющих высокий и средний уровни готовности.

На практических занятиях при решении проблемных задач также была проведена оценка творческой активности обучающихся. Анализ проводился преподавателями методом экспертных оценок деятельности обучающихся при выполнении ими тех же заданий, что и при анализе их уровня готовности применять накопленные знания. Признаком, по которому проводилась экспертная оценка творческой деятельности обучающихся, являлась их способность предлагать альтернативные подходы при выполнении элементов (этапов) решения проблемных задач:

- установления истоков проблемы, лежащей в основе задачи;
- постановки проблемы исследования;
- разработки и реализации методов исследовательской деятельности;
- проведения критического анализа полученных экспериментальных данных;
- выявления перспективных направлений практического использования изучаемого явления (объекта).

Уровень творческой активности обучающихся оценивался как высокий, когда они предлагали и реализовывали альтернативные подходы при выполнении как минимум трех из указанных выше элементов поэлементного анализа, *средний* уровень – при выполнении двух из указанных элементов, *низкий* уровень – при выполнении менее, чем двух элементов поэлементного анализа.

В *таблице 2* представлены результаты анализа изменения творческой активности обучающихся, которые свидетельствуют о росте относительного количества обучающихся, проявивших высокий и средний уровни.

Результаты исследования демонстрируют рост относительного количества обучающихся, проявляющих высокий и средний уровни творческой активности при решении проблемных учебно-исследовательских задач.

**Таблица 2 - Динамика изменения уровней творческой активности обучающихся при выполнении исследовательских заданий**

Уровень творческой активности обучающихся	Относительное количество обучающихся, проявивших указанный уровень, % (общее количество студентов $N=200$ )			
	Контрольная точка №1	Контрольная точка №2	Контрольная точка №3	Контрольная точка №4
Высокий уровень	9.3	12.4	15.6	18.3
Средний уровень	24.8	27.2	33.7	36.8
Низкий уровень	65.9	60.4	50.7	44.9

### Заключение

Важной задачей инженерного образования сегодня было и остается повышение его эффективности. Современные достижения социума в области науки и техники требует от будущих выпускников политехнических вузов адекватных представлений об фундаментальных основах нанотехнологий. В этой связи в настоящей работе продемонстрирована эффективность применения методического подхода, направленного на приобретение обучающимися фундаментальных знаний в области наукоемких технологий путем решения циклов специализированных проблемных учебно-исследовательских задач. В ходе педагогического эксперимента была проанализирована эффективность предлагаемых методических разработок и доказано, что применение развиваемого подхода в системе подготовки будущих инженерных кадров способствует приобретению обучающимися фундаментальных знаний в области физики наноструктур и формированию у них профессионально-значимых компетенций. Обладая системным качеством отдельные циклы проблемных учебно-исследовательских задач в области физики наноструктур могут содержать предмет теоретических и экспериментальных исследований в процессе подготовки обучающихся.

### Библиография

1. Александров А.А., Федоров И.Б., Медведев В.Е. Инженерное образование сегодня: проблемы и решения // Высшее образование в России. 2013. № 12. С. 3–7.
2. Гасумянц В.Э. Размерное квантование. Часть 1: учебное пособие. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2010. 264 с.
3. Гасумянц В.Э. Размерное квантование. Часть 2. Оптические и кинетические свойства полупроводниковых наноструктур: учебное пособие. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2010. 242 с.
4. Джардималиева Г.И., Кыдралиева К.А., Метелица А.В., Уфлянд И.Е. Наноматериалы. Свойства и сферы применения. СПб: Лань, 2021. 200 с.
5. Жуков А.Е. Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур. СПб.: Элмор, 2007. 304 с.
6. Зебрев Г. Физические основы кремниевой наноэлектроники: учебное пособие для вузов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 240с.
7. Колесников Ю.Л., Никоноров Н.В. Современная фотоника и подготовка кадров // Физическое образование в ВУЗах. 2013. Т. 19. № 1. С. 19- 24.
8. Ларченкова Л.А. Образовательный потенциал учебных физических задач в современной школе: автореферат. диссертации на соискание ученой степени доктора педагогических наук. СПб., 2014. 40 с.
9. Рубинштейн С.Л. Основы общей психологии. Издательство АСТ, 2024. 960с.
10. Садыкова А.Ю., Холин К.В. Курс физики в инженерном образовании и тенденции современности. Физика в системе современного образования: материалы XVII международной конференции. 2023. С. 425-433.

---

## Practice-oriented approach to studying solid state physics

**Vyacheslav A. Doronin**

PhD in Physical and Mathematical Sciences,  
Lecturer,  
Department of Physics,  
Mozhaisky Military Space Academy,  
197198, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation;  
e-mail: doroninslava@rambler.ru

**Aleksandr A. Shchedrovskii**

Lecturer,  
Department of Physics,  
Mozhaisky Military Space Academy,  
197198, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, Russian Federation;  
e-mail: aai\_51@mail.ru

### Abstract

The article demonstrates the possibilities of using a practice-oriented approach in engineering education when studying solid-state electronics. Modern electronics is nanoelectronics, the fundamental basis of which is the physics of nanostructures. The purpose, objectives, and scientific novelty of this practice-oriented training are highlighted. Methodological, motivational and developmental resources have been established for the content of the subject material of the physics of nanostructures in the training of engineers at polytechnic universities.

The work presents a methodological approach to mastering the content of fundamental subject material in the field of nanoelectronics by solving cycles of applied educational and research problems. When solving such problems, students can be demonstrated the nonlinearity of the methodology of modern scientific research in the field of physics of nanostructures. The experience of obtaining knowledge in the stated field is demonstrated not in a ready-made form, but by solving problematic problems, the distinctive feature of which is the modeling of research work in all its components of the organization of activities.

### For citation

Doronin V.A., Shchedrovskii A.A. (2024) Praktiko-orientirovannyi podkhod pri izuchenii fiziki tverdogo tela [Practice-oriented approach to studying solid state physics]. *Pedagogicheskii zhurnal* [Pedagogical Journal], 14 (6A), pp. 378-391.

### Keywords

Professionally significant competencies of future engineers, modern strategies for the development of higher education in Russia, physics of nanostructures, practice-oriented approach, engineering education.

---

## References

1. Alexandrov A.A., Fedorov I.B., Medvedev V.E. (2013) Inzhenernoe obrazovanie segodnya: problemy i resheniya [Engineering Education Today: Problems and Solutions]. *Vysshee obrazovanie v Rossii* [Higher education in Russia], No. 12. pp. 3–7.
2. Gasumyanc V.E. (2010) *Razmernoe kvantovanie. CHast' 1: uchebnoe posobie* [Dimensional quantization. Part 1: tutorial.]. Saint Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta.
3. Gasumyanc V.E. (2010) *Razmernoe kvantovanie. CHast' 2. Opticheskie i kine-ticheskie svoystva poluprovodnikovyyh nanostruktur: uchebnoe posobie* [Size quantization. Part 2. Optical and kinetic properties of semiconductor nanostructures: a tutorial]. Saint Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta.
4. Dzhardimalieva G.I., Kydralieva K.A., Metelica A.V., Uflyand I.E. (2021) *Nanomaterialy. Svoystva i sfery primeneniya* [Nanomaterials. Properties and Applications]. Saint Petersburg: Lan'.
5. Zhukov A.E. (2007) *Lazery na osnove poluprovodnikovyyh nanostruktur* [Lasers based on semiconductor nanostructures]. Saint Petersburg: Izdatel'stvo «Elmor».
6. Zebrev G. (2011) *Fizicheskie osnovy kremnievoj nanoelektroniki: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Physical foundations of silicon nanoelectronics: a textbook for universities.]. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy.
7. Kolesnikov YU.L., Nikonorov N.V. (2013) *Sovremennaya fotonika i podgotovka kadrov* [Modern photonics and personnel training]. *Fizicheskoe obrazovanie v VUZah* [Physics education in universities], T. 19, № 1, pp. 19-24.
8. Larchenkova L.A. (2014) *Obrazovatel'nyj potencial uchebnyh fizicheskikh zadach v sovremennoj shkole: avtoreferat. dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora pedagogicheskikh nauk* [Educational potential of educational physics problems in modern school]. SPb.
9. Rubinshtejn S.L. (2024) *Osnovy obshchej psihologii* [Fundamentals of General Psychology]. Izdatel'stvo AST.
10. Sadykova A.YU., Holin K.V. (2023) *Kurs fiziki v inzhenernom obrazovanii i tendencii sovremennosti* [Physics course in engineering education and modern trends]. *Fizika v sisteme sovremennogo obrazovaniya: materialy XVII mezhdunarodnoj konferencii*. [Physics in the modern education system]. pp. 425-433.