

К. Г. Никифоров

Калужский государственный университет имени К. Э. Циолковского
e-mail: kgn@kspu.kaluga.ru**О СТАНОВЛЕНИИ И РАЗВИТИИ ТРИАДЫ
«НАНОФИЗИКА – НАНОТЕХНОЛОГИЯ – НАНОЭЛЕКТРОНИКА»**

Обсуждены пути формирования образовательной программы подготовки магистра педагогического образования (профиль «физическое образование»). Авторский курс «Современные проблемы физики» описан как модуль вариативной части программы подготовки в магистратуре. Особое внимание уделено методологическому анализу становления и развития триады «нанопфизика – нанотехнология – наноэлектроника».

Ключевые слова: физическое образование, образовательный процесс, содержательная основа обучения, современные проблемы физики, нанопфизика, нанотехнология, наноэлектроника.

Постановка проблемы. В рамках академической свободы, предоставленной сегодня университету, возникает глобальная задача: осуществить полномасштабное наполнение образовательной программы бакалавриата–магистратуры [1; 2]. В вариативной части подготовки магистра педагогического образования по профилю «физическое образование» одним из принципиально важных можно считать модуль «Современные проблемы физики» [3; 4].

Его востребованность в программе подготовки педагога-физика несомненна. Физика вносит основополагающий вклад в интеграцию естественных наук. Физика, основанная на системном подходе, формирует базовые научные представления о Физическом Мире. Физика – источник многочисленных прикладных наук и базис большинства современных наукоемких «высоких технологий», тем самым она является важнейшим элементом современной цивилизации.

В то же время в средней школе практически не изучаются новейшие физические достижения, что создает у учащихся (а зачастую и у их педагогов) неверное представление, что формирование физики как науки завершилось где-то в середине XX века. Конечно, отсутствие в программах вузов и школ сведений о современной физике вызвано и объективными причинами, к которым относятся, прежде всего, сложность наблюдаемых физических явлений и очень высокий уровень математизации физики.

Цель работы. Сегодняшние потребности в преподавателях физики для школ с углубленным изучением предмета, лицеев и гимназий требуют модернизации профессионального образования для соответствия его уровню последних достижений современной физики и её прикладных применений. В определенной степени способствовать этому должен курс «Современные проблемы физики».

С появлением новых теоретических представлений, компьютерных вычислительных методов и экспериментальных методик, основанных на принципиально новых идеях и технологиях, физическая наука достигла значительного прогресса.

Одним из важнейших вопросов, который подлежит обязательному изучению в рамках данного курса, – это становление и перспективы развития триады «нанопфизика – нанотехнология – наноэлектроника».

Изложение основного материала. Точкой отсчета научно-технической революции XX века, основанной на твердотельной электронике, можно считать 1940-е годы, когда в результате фундаментальных исследований полупроводников был открыт транзисторный эффект – эффект усиления, генерации и преобразования электрических колебаний (W.B. Shockley, J. Bardeen, W.H. Brattain, Bell Laboratories, Мюррей-Хилл, США) [5].

Современная электроника развивается в двух принципиально новых направлениях: наноэлектроника и спинтроника. Первое направление, хотя и связано с переходом к наноразмерным активным областям структур, сравнимым с атомными размерами и длиной свободного пробега электрона, по-прежнему базируется на переносе заряда электрона. Однако переход к наноразмерным материалам и структурам (с линейными размерами меньше, чем 100 нм) приводит к принципиально новым физическим эффектам [6] (хотя некоторые из таких «наноэффектов», известны уже давно, например, туннельный эффект).

В наноэлектронике сегодня выделяются два перспективных направления: 1) создание наноматериалов (среди которых фуллерены, нанотрубки, графен) и 2) создание наноструктур – материалов, содержащих нанообъекты (квантовые ямы, квантовые нити, квантовые точки). Здесь мы остановимся на анализе фундаментальных основ более обширного второго направления – рассмотрим квантово размерные объекты, создаваемые в матрице объемного материала.

Нанотехнология – это совокупность методов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, которые включают компоненты размерами менее 100 нм хотя бы в одном измерении, и позволяющих осуществлять их интеграцию в функционирующие системы большего масштаба.

Наноматериал – материал, содержащий структурные элементы, геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающий качественно новыми свойствами, в том числе заданными функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Традиционно начало эры нанотехнологий связывают с идеями доклада Р. Фейнмана (1959) «There's plenty of room at the bottom» [7]. Им были сформулированы основные нанотехнические принципы нанотехнологий, которые сегодня воплощаются в действительность. По мнению Фейнмана, работа с объектами, имеющими наноразмеры, допустима в принципе, согласно законам физики, которые не выступают против возможности маневрирования атома атомом.

Сам термин «нанотехнология» (nanotechnology) предложил в 1974 году Н. Танигучи (N. Taniguchi, Tokyo Science University, Токио, Япония) [8]: «нанотехнологии преимущественно состоят из процессов разделения, объединения и деформации материалов атом за атомом или молекула за молекулой». В широкое употребление термин «нанотехнология» ввел Э. Дрекслер, издавший в 1986 году первую книгу по нанотехнологиям [9]:

Однако можно отметить, что физические основы нанотехнологий были заложены с возникновением квантовой механики. К её важнейшим первым этапам относится идея о волновых свойствах материи (де Бройль, 1923), создание волновой механики на основе уравнения Шрёдингера (1926), вероятностная интерпретация волновой функции (Борн, 1926), формулирование принципа неопределённости (Гейзенберг, 1927). Одним из первых физических эффектов, имеющих чисто квантовую природу, стал туннельный эффект.

Впервые теорию прохождения частиц через потенциальный барьер предложили в 1928 году Л.И. Мандельштам и М.А. Леонтович (Московский университет, Москва) [10]. В том же году Фаулер и Нордгейм (R. Fowler, L. Nordheim, Cambridge University, Кембридж, Великобритания) построили теорию туннельной эмиссии электронов из твёрдого тела в вакуум, инициируемой сильным электрическим полем [11], успешно применяемую и для описания процессов туннелирования в твёрдом теле.

В 1931-1932 годах Я.И. Френкель (Физико-технический институт, Ленинград) разработал туннельные теории прохождения тока через контакт двух металлов (тонкую изолирующую прослойку) и границу металл-полупроводник (через запорный изолирующий слой) [12; 13].

В 1958 году Л. Есаки (L. Esaki, Sony Corp, Токио, Япония) обнаружил туннельный эффект в полупроводни-

кових структурах (с шириной барьерного слоя 5-15 нм) и создал на его основе туннельный диод [14].

Нанoeлектроника, базирующаяся на использовании нанотехнологий и наноматериалов, непосредственно связана с формированием низкоразмерных объектов – квантовых точек (quantum dots), ям (quantum wells) и нитей (quantum wires) [15,16]. Квантовые размерные эффекты начинают проявляться, если размеры d кристалла (или структуры) сравнимы с длиной волны де Бройля λ :

$$d \approx \lambda = \frac{h}{p}$$

Соответственно, квантовые размерные объекты классифицируются по числу измерений, в которых осуществляется движение носителей заряда:

– 2D структуры: квантовые ямы (нанослои, сверхструктуры);

– 1D структуры: квантовые нити,

– 0D структуры: квантовые точки (нанокластеры).

При этом энергия носителей заряда квантуется [15; 16]:

– в квантовой яме в одном направлении

$$E = E_n + \frac{(p_x^2 + p_y^2)}{2m^*}; \quad E_n = \frac{p_z^2}{2m^*} = \frac{p^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n^2, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

(где p_x, p_y, p_z – проекции квазиимпульса p , m^* – эффективная масса, d – характерный размер квантового объекта);

– в квантовой нити в двух направлениях

$$E = E_{kn} + \frac{p_x^2}{2m^*}; \quad E_{kn} = \frac{p_y^2(z)}{2m^*} = \frac{p^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n^2, \quad n(k) = 1, 2, 3 \dots;$$

– в квантовой точке во всех трёх направлениях

$$E = E_{kln} = \frac{p_x^2(y,z)}{2m^*} = \frac{p^2 \hbar^2}{2m^* d^2} n^2, \quad n(k,l) = 1, 2, 3 \dots$$

В 1965 году Б.А. Тавгер (Горьковский университет, Горький) теоретически обосновал существование квантовых размерных эффектов в низкоразмерных объектах, толщина которых сравнима с эффективной длиной волны носителей заряда [17]. Он предложил использовать туннелирование электронов в сэндвич-структуре из полупроводниковых пленок (с промежуточным диэлектрическим – окисным – слоем) для прямого экспериментального обнаружения квантования энергии носителей заряда. Это было доказано экспериментально М.Е. Елин-соном и др. (1966, Институт радиотехники и электроники, Москва) на тонких пленках висмута толщиной 20-160 нм [18].

Эффекты размерного квантования, связанные с квантовой ямой, предложенной Генри (1972, С. Henry, Bell Laboratories, Нью-Джерси, США), впервые наблюдали в 1974 году в оптических спектрах гетероструктур GaAs–AlGaAs, которые содержали сверхтонкий слой GaAs 14...21 нм [19].

Отметим, что для создания квантово размерных объектов наиболее широко используется молекулярно-лучевая эпитаксия (molecular beam epitaxy), созданная в конце 1960-х годов Артуром и Чо (J. R. Arthur, A.Y. Cho, Bell Laboratories, Мюррэй-Хилл, США). В основе метода лежит осаждение вещества, испаренного в молекулярном источнике, на кристаллическую подложку в условиях сверхвысокого вакуума [20]. Несмотря на простую идею, реализация данной высокой технологии требует сложных технических решений:

– в рабочей камере установки необходимо поддерживать сверхвысокий вакуум (около 10^{-8} Па);

– чистота испаряемых материалов должна достигать 99,999999%;

– необходим молекулярный источник, способный испарять тугоплавкие вещества и регулировать плотности их потока.

Уменьшая ширину квантовой ямы (до нескольких атомарных слоёв), её можно преобразовать в квантовую точку. Первый квантовый размерный эффект, связанный с квантовыми точками, наблюдали в 1981 году А.И. Екимов и А.А. Онущенко (Государственный оптический институт, Ленинград). Был обнаружен размерно зависимый сдвиг линий экситонного поглощения в «микрорекристаллах» CuCl диаметром 5...60 нм, находившихся в матрице–стекле [21].

Первые квантовые нити (размером в сечении 20×20 нм) были получены в 1982 году (А.С. Gossard, Bell Laboratories, Мюррэй-Хилл, США) в гетероструктурах GaAs–Ga_{1-x}Al_xAs [22]. Квантовые нити или квантовые проволоки формируются методом субмикронной литографии – вытравливанием узкой полоски из гетероструктуры, созданной методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

В 1970 году Есаки и Цу (L. Esaki, R. Tsu, IBM Watson Research Center, Йорктаун, США) предложили создание в кристалле искусственного периодического потенциала – сверхрешётки («man-made crystal») [23]. Такая структура содержит чередующиеся наноразмерные слои двух полупроводников; период её больше постоянных кристаллической решётки, но меньше длины свободного пробега электронов. Периодический потенциал сверхрешётки модернизирует зонную структуру исходных полупроводников, создавая минизоны в пространстве волнового вектора и энергетические подзоны.

В 1971 году Ж.И. Алфёровым и др. (Физико-технический институт, Ленинград) методом молекулярно-лучевой эпитаксии была синтезирована первая реальная сверхрешетка GaAs–GaP_{0.3}As_{0.7}, содержащая 200 слоёв толщиной 10 нм каждого [24].

Развитие нанofизики и её приложений сделало возможной визуализацию наноразмерных объектов. Это обеспечила электронная микроскопия – метод исследования атомно-молекулярной структуры, использующий электронные принципы построения изображения.

Физические пределы разрешающей способности оптической микроскопии равны $\approx 1/3$ длины волны излучения: при освещении белым светом можно наблюдать только детали размером $\geq 0.1-0.2$ мкм (увеличение $\times 500$). Разрешающая способность микроскопа значительно возрастает при использовании волновых свойств электрона. Применяя ускоренные электроны энергией $\sim 10^5$ эВ (длина волны де Бройля $\sim 10^{-11}$ м), различают объекты атомарных размеров (увеличение $\times 10^4$ раз и более).

Электронные микроскопы, использующие взаимодействие электронного пучка с исследуемым веществом, по принципу действия подразделяются на просвечивающие (ПЭМ, Transmission Electron Microscope) и растровые (РЭМ, Scanning Electron Microscope).

Первый (просвечивающий) электронный микроскоп создали ещё в 1931 году (М. Knoll, E. Ruska, Technische Hochschule, Берлин, Германия). В ПЭМ в высоком вакууме до 10^{-4} Па ускоренные электроны проходят сквозь объект толщиной 1 нм...10 мкм. При анализе ПЭМ разрешение достигает 0,1 нм, то есть можно «визуализировать» отдельный атом.

РЭМ предназначен для получения изображения поверхности объекта, а также информации о её составе и строении. Принцип его действия разработал в 1942 году В.К. Зворыкин (Radio Corporation of America, Принстон, США). Первый РЭМ, созданный в 1952 году (С. Oatley, Cambridge University, Кембридж, Великобритания), достиг разрешения в 50 нм и обеспечил трёхмерный эффект воспроизведения рельефа образца – характерную особенность всех современных РЭМ. Современный РЭМ позволяет достичь разрешения в 0,4 нм (увеличение $\times 10^7$).

Дальнейшее развитие микроскопии связано со сканирующим зондовым микроскопом (СЗМ, Scanning Probe Microscope), изобретённым в 1981 году (G. Binnig, H. Rohrer, IBM Zurich Research Laboratory, Рюхликон, Швейцария). В СЗМ процесс получения изображения поверхности и её локальных характеристик основан на сканировании поверхности зондом [25].

В основе СЗМ лежит детектирование локального взаимодействия, возникающего между зондом и поверхностью исследуемого образца при расстоянии порядка характерной длины затухания взаимодействия «зонд–образец». В зависимости от природы этого взаимодействия различают сканирующие микроскопы: туннельный (СТМ; детектируется туннельный ток), силовой (ССМ; детектируется силовое взаимодействие), ближнепольный оптический (БСОМ; детектируется электромагнитное излучение).

Метод зондового сканирования позволяет исследовать как проводящую, так и непроводящую поверхности,

материалы и биологические объекты в нормальных для них условиях (без вакуумирования).

Выводы. Высокие технологии (high technology, high tech, hi-tech) стали третьим компонентом – наравне с теорией и экспериментом – в развитии современной науки, особенно физики. Заметно сократился временной интервал между теоретическими предсказаниями и экспериментальными подтверждениями, между экспериментальными открытиями и теоретическими объяснениями, между научными открытиями и их прикладным использованием.

Высокие технологии современности обеспечивают очередную научно-техническую революцию. Они не только базируются на новейших достижениях естественных наук, прежде всего физики, но и позволяют получить принципиально новые фундаментальные физические результаты, и тем самым способствуют развитию этой науки.

Особенно ярко это проявляется на примере рассмотренной триады «нанопизика – нанотехнология – нанoeлектроника».

Список использованных источников:

1. Атаманчук П.С. Педагог-физик XXI века. Основы формирования профессиональной компетентности / Атаманчук П.С., Никифоров К.Г., Губанова А.А., Мыслинская Н.Л. – Калуга – Каменец-Подольский : Изд-во КГУ им. К.Э. Циолковского, 2014. – 278 с.
2. Никифоров К.Г. О содержательной стороне основной образовательной программы подготовки бакалавра – магистра физико-математического образования в рамках федерального государственного образовательного стандарта третьего поколения / К.Г. Никифоров // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. І. Огієнка. Серія педагогічна. – Кам'янець-Подільський, 2009. – Вип.15. – С. 35-37.
3. Никифоров К.Г. Модуль «Современные проблемы физики» в программе подготовки магистра педагогического образования (профиль «физика») / К.Г. Никифоров // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. І. Огієнка. Серія педагогічна. – Кам'янець-Подільський, 2012. – Вип.18. – С. 71-72.
4. Никифоров К.Г. Современные проблемы физики : учебное пособие / К.Г. Никифоров. – Калуга : Изд-во КГУ им. К.Э. Циолковского, 2013. – 176 с.
5. Тригг Дж. Физика XX века: ключевые эксперименты / Дж. Тригг. – М. : Мир, 1978. – С. 168-192.
6. Алферов Ж.И. Наноматериалы и нанотехнологии / Алферов Ж.И., Копьев П.С., Суриц Р.А., Асеев А.Л. // Нано- и микро-системная техника. – 2003. – № 8. – С. 3-13.
7. Feinman R. There's Plenty of Room at the Bottom // Caltech's Engineering and Science. February 1960. P.22-36; J. Microelectromechanical Systems. 1992. Vol.1, #1. P.60-66.
8. Taniguchi N. On the Basic Concept of 'NanoTechnology' // Proc. Int. Conf. Prod. Eng. Pt. II, Tokyo. Japan Society of Precision Engineering, 1974.
9. Drexler E. Engines of Creation: The coming era of nanotechnology and nanosystems: molecular machinery, manufacturing, and computation. – New York: Anchor Books, 1986.
10. Mandelstam L., Leontovich M. Zur Theorie der Schrodinger'schen Gleichung // Zeitschrift fur Physik. 1928. Bd.47, H.1-2. S.131-136; Леонтович М. А., Мандельштам Л.И. К теории уравнения Шредингера // УФН. 1978. Т.124, вып.3. С.547.
11. Fowler R.H., Nordheim L. Electron emission in intense electric field // Proc. Roy. Soc. 1928. Vol.A119. P.173-181.
12. Frenkel J.I. On the electrical resistance of contacts between solid conductors // Phys. Rev. 1930. Vol.36. P.1604-1618.
13. Frenkel J., Ioffe A.F. On the electric and photoelectric properties of contacts between a metal and a semiconductor // Phys. Rev. 1932. Vol.39. P.530-531.
14. Esaki L. New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions // Phys. Rev. 1958. V.109. P.603.
15. Демиховский В.Я. Физика квантовых низкоразмерных структур / Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А. – М. : Логос, 2000. – 248 с.
16. Шик А.Я. Физика низкоразмерных систем / Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. – СПб. : Наука, 2001. – 160 с.
17. Тавгер Б.А. Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых и полуметаллических пленках / Б.А. Тавгер, В.Я. Демиховский // УФН. – 1968. – Т.96, вып.1. – С. 61-86.
18. Огрин Ю.Ф. О наблюдении квантовых размерных эффектов в тонких пленках висмута / Огрин Ю.Ф., Луцкий В.Н., Елинсон М.И. // ЖЭТФ (Письма). – 1966. – Т.3, вып.3. – С. 114-118.
19. Dingle R., Wiegmann W., Henry C.H.. Quantum states of confined carriers in very thin $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ heterostructures // Phys. Rev. Lett. 1974. Vol.33. P.827-830.
20. Cho A.Y., Arthur J.R. Molecular beam epitaxy // Progr. Sol. St. Chem. 1975. Vol.10. P.157-192.
21. Екимов А.И. Квантовый размерный эффект в трехмерных микрокристаллах полупроводников / А.И. Екимов, А.А. Онущенко // ЖЭТФ (Письма). – 1981. – Т.34, вып.6. – С. 363-366.
22. Petroff P.M., Gossard A.C., Logan R.A., Wiegmann W. Toward quantum well wires: fabrication and optical properties // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 41, #7. P.635-638.
23. Esaki L., Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors // IBM J. Res. Dev. 1970. Vol.14, #1. P.61-65.
24. Алферов Ж.И. Расщепление зоны проводимости в «сверхрешетке» на основе $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ / Алферов Ж.И., Жилиев Ю.В., Шмарцев Ю.В. // ФТП. – 1971. – Т.5. – С. 196.
25. Binning G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy // Surf. Sci. 1983. Vol. 126. P.236-244.

К. Г. Нікіфоров

Калужський державний університет імені К. Е. Циолковського

ПРО СТАНОВЛЕННЯ І РОЗВИТОК ТРИАДИ «НАНОФІЗИКА – НАНОТЕХНОЛОГІЯ – НАНОЕЛЕКТРОНІКА»

Обговорено шляхи формування освітньої програми підготовки магістра педагогічної освіти (профіль «фізична освіта»). Авторський курс «Сучасні проблеми фізики» описаний як модуль варіативної частини програми підготовки в магістратурі. Особливу увагу приділено методологічному аналізу становлення і розвитку триади «нанопизика – нанотехнологія – нанoeлектроніка».

Ключові слова: фізична освіта, освітній процес, змістова основа навчання, сучасні проблеми фізики, нанопизика, нанотехнологія, нанoeлектроніка.

K. G. Nikiforov

Tsiolkovsky Kaluga State University

ABOUT BECOMING AND DEVELOPMENT OF «NANOPHYSICS – NANOTECHNOLOGY – NANO-ELECTRONICS» TRIAD

Some ways of creation of the basic educational program of preparation of the master of physical education are discussed. Author's educational subject «Modern Problems of Physics» is described as a part of the variety part of educational program of a magistracy. General attention is given to the methodological analysis of becoming and development of a triad «nanophysics – nanotechnology – nanoelectronics».

Key words: physical education, teaching program. scientific basis of training, variety part of educational program, modern problems of physics. nanophysics, nanotechnology, nanoelectronics.

Отримано: 14.06.2014