

## ОБЗОРЫ

УДК 621.38:537.86

© Н. Н. Петров

**ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В публикации дано современное определение науки "физическая электроника", приведена история ее становления и подведены итоги ее развития к концу XX века. Определены новейшие направления на ближайшие годы. Обоснована главная направленность физической электроники — физика активных (рабочих) сред электроники, управляющих (обеспечивающих управление) функционированием разнообразных систем (в том числе и биологических объектов), изготовленных человеком для своей деятельности.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Прежде всего, необходимо определиться с предметом этой отрасли знаний, тем более, что современное общепризнанное определение отсутствует. Первая попытка сформулировать это понятие была предпринята на кафедре физической электроники ЛПИ в 1986 г. в сборнике «Проблемы физической электроники» [1], следующим шагом было определение Н.Д. Девяткова и А.С. Тагера в энциклопедическом словаре «Электроника» (1991) [2]. Современной физической электронике я бы дал такое определение:

*Физическая электроника (ФЭ) — наука, изучающая взаимодействия частиц и электромагнитных излучений с полями, конденсированным веществом (включая биологические объекты) и друг с другом, а также разрабатывающая научные основы использования этих взаимодействий в практических целях.*

**НЕМНОГО ИСТОРИИ**

Исходный момент зарождения ФЭ — обнаружение эмиссионных явлений (термоэмиссии и внешнего фотоэффекта) в конце XIX и начале XX вв., хотя катодное распыление было открыто уже в середине XIX в. Начало активного периода развития ФЭ связано с её востребованностью в деле создания и совершенствования радиоламп. В 30-е годы произошло формирование 3-х разделов эмиссионной электроники в соответствии с физическим принципом явления: эмиссия, транспортировка, уход частиц из рабочего вещества. Именно эти базовые разделы стали фундаментом развития ФЭ. Однако уже в 50-е годы рамки её стали раздвигаться в связи с созданием полупроводниковых приборов, а значит, необходимостью изучения эмиссионных явлений не в вакуум, а в другие материальные среды.

**ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА СЕГОДНЯ КАК ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА ВСЕХ ВЕТВЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Какова же главная направленность ФЭ в последние годы? Если обобщить направленность всех традиционных ветвей электроники, то это — физика активных (рабочих) сред электроники, управляющих (обеспечивающих управление) функционированием разнообразных электронных устройств, изготовленных человеком для своей деятельности. В этом смысле можно говорить о ФЭ как науке, обеспечивающей физическую базу развития всех ветвей электроники (количество ветвей электроники и, соответственно, число их названий в справочных изданиях уже превысило 30).

**АКТИВНЫЕ (РАБОЧИЕ) СРЕДЫ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ НАУКОЕМКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

В основе этого понятия лежат традиционные среды: вакуум, плазма, твердое тело (полупроводники), однако в нынешнем всё усложняющемся мире появляются новые возможности управления параметрами этих сред и появляются объекты, обладающие специфическими свойствами.

1. Вакуум. Современный вакуум всё ближе к своему понятию, т.е. он практически не содержит корпускулярных частиц и, следовательно, поля выступают на первый план (монокинетизация частиц, энергоанализаторы разнообразных систем).
2. Вакуум с быстропеременными полями: ВЧ, СВЧ и более коротковолновыми (микроволновая электроника).
3. Пространственный заряд (интенсивные пучки частиц, в т.ч. релятивистских скоростей).
4. Газовый разряд и плазма — как низко-, так и высокотемпературная (проблемы «стенки»).
5. Жидкость в контакте с вакуумом и парами (Hg приборы, жидкометаллические источники).
6. Жидкие кристаллы.

7. Твердотельные устройства всевозможных конфигураций (микро-, акусто-, оптоэлектроники и т.п.) и пространственно-неоднородные структуры.

8. Маломерные структуры — двух, одно и нульмерные. Поверхность как особая фаза вещества (нанoeлектроника).

9. Резконравновесные системы при мощном импульсном выделении энергии. Эктоны.

Итак, даже самый поверхностный и неполный обзор указывает на великое разнообразие рабочих сред и, соответственно, объектов изучения, анализа и использования.

### ИТОГИ РАЗВИТИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ К КОНЦУ XX ВЕКА

Основной итог — безусловно, создание и повсеместное функционирование множества устройств и приборов, сформировавших и формирующих информационное пространство человечества.

Однако есть и второй, очень важный итог: на основе выполненных фундаментальных исследований накоплен богатейший запас знаний, увязывающих эмиссионные процессы с комплексом параметров материалов. Эти знания легли в основу новой отрасли науки — физики поверхности. Маломерные материальные объекты, составляющие основу современных приборов, можно формировать и анализировать только методами ФЭ.

### ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Общезвестны давно используемые в науке и промышленности установки для анализа твердого тела, основанные на вторично-эмиссионных явлениях — главный пример, подтверждающий выше изложенный тезис. В последние же годы ФЭ всё больше начинает определять весь технологический цикл создания прибора как формирование объекта при непрерывном контроле процесса. Что характерно для современных научных подходов в области технологии микрообъектов? Поскольку в создании маломерных объектов счет идет на отдельные атомы, на первый план выступают квантовые явления и закономерности. Основой процесса создания элементов с новыми, точно запрограммированными свойствами является математическое моделирование и компьютерная обработка результатов. Достоверность полученной модели будет зависеть, прежде всего, от объема знаний, полученных при анализе элементов предыдущего поколения и возможностей оперативного и комплексного анализа получаемых экспериментальных образцов.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ «ЗАПРОСЫ» МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Что нужно знать о материале (образце) на элементарном уровне?

Основные характеристики:

1. Элементный состав.
2. Расположение частиц (кристаллическое строение или аморфные параметры).
3. Электронная структура.

Производные характеристики:

1. Химическое строение.
2. Динамика частиц.
3. Магнитные свойства (спиновые состояния и пр.).

Почти все эти параметры можно определить в настоящее время эмиссионными методами, а некоторые, особенно в случае маломерных объектов, только эмиссионными. Таким образом, эмиссионная электроника не только не «умерла» с концом эры вакуумных радиоламп, а оказалось в центре современных наукоёмких технологий, для которых характерна неразрывность контроля и самого технологического процесса.

### НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ

1. Основой большинства технологических циклов является, как известно, процесс привнесения частиц различных элементов в определенных количествах в определенное место. Отсюда — проблема источников частиц и излучений. Пучки атомов должны не только быть строго определенного состава, они должны иметь строго заданную энергию и обеспечивать «высаживание» в определенном состоянии ориентации.
2. Управление параметрами наносимых частиц, масс- и энергоанализ. Эту проблему нельзя назвать решенной в случае потоков большой площади сечения. В электронике больших мощностей исключительную роль играет пространственный заряд, уход частиц на электроды (вспомним и о проблеме 1-й стенки ТЯР).
3. Проблема диагностики свойств и параметров на макроуровне, особенно таких объектов, как твердое тело с изменяющимся по глубине составом, толстые пленки. Учет таких явлений как адгезия, сегрегация, радиационные дефекты и т. п. Положительный эффект, как мне кажется, могут дать методы, основанные на совокупном применении для анализа различных частиц (например, электронов и квантов).
4. Диагностика на микроуровне для маломерных систем и нанотехнология. В настоящее время

известно немало методов анализа, но, как правило, в разных случаях нужно использовать разные сочетания. Универсального метода пока нет. Огромным прорывом последнего десятилетия следует считать открытие и практическое воплощение методики сканирующей туннельной спектроскопии, а далее атомно-силовой микроскопии. В области технологии главное достижение следует считать в области создания методов управления предельно малыми потоками атомных частиц, что позволило выйти на процесс «атомной стройки», когда каждый атом высаживается в предназначенное ему место.

5. Расширение возможностей создания методами ФЭ принципиально новых материалов и анализ их свойств, стабильности и т.п. (например, исследование фуллеренов и фуллеридов). Прорыв здесь может быть сделан на основе дальнейшего понимания особых физико-энергетических свойств поверхности, на которой могут возникать новые, неожиданные фазы и соединения (очень интересна, например, система SiC–GaN). Известно, что в сильном электрическом поле существует адсорбция на поверхности инертных газов, и образуются сложные ионы с участием даже He.
6. Специфический интерес к отдельным (в том числе свободным) сложным молекулам и кластерам. Их «жизнь» очень не проста и требует новых методов «расшифровки» (полезными тут могли бы быть знания и методики, применяемые при изучении поверхностной ионизации). Особенное значение это может иметь в области экологии.
7. Резкоотермически неравновесные системы: воздействие мощного лазерного излучения или собственного тока. Эктоны, по Г.А. Месяцу, — плотная плазма, очень короткоживущая, с особыми свойствами (взрывная эмиссия). Проблемы управления подобными процессами требуют дальнейшей проработки.
8. Пространственный заряд, его колебательные свойства как способ генерации и усиления различных частот. Нужны новые разработки по управлению его формой, в том числе по созданию специфических конфигураций.
9. Отдельные, далеко не решенные вопросы: оптические методы обработки информации, распространение лазерного излучения в различных средах (в том числе резко неоднородных), его отражение, управление рельефом отражателей и т. п.

В этом перечне я намеренно коснулся, в основном, тех проблем, которые с ФЭ часто не увязываются или звучат приглушенно, хотя без её специфических подходов не могут быть продвинуты и решены, и не упомянул важнейшие традицион-

ные проблемы, например, процессы при ионной имплантации и ионном облучении.

### НОВЕЙШИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Современное развитие цивилизации на первый план выдвигает изучение окружающего человека мира, биологических объектов и самого человека.

Обладая таким грандиозным арсеналом исследовательских средств, естественно применить его не только для создания специальных приборов и устройств, являющихся частью информационных систем (которые, впрочем, можно использовать более широко, опять-таки, не в военно-промышленных, а в эколого-медицинских аспектах), но и к анализу жизненно важных процессов и выработке методик положительного на них воздействия. Одна из первых таких попыток была предпринята в 50-е годы узбекской школой физэлектронщиков во главе с акад. У.А. Арифовым (облучение семян хлопчатника). Большой вклад в это направление внес акад. Н.Д. Девятков (стимулирование работ на кафедре ФЭ ЛПИ по Кирлиан-эффекту, ныне всё чаще используемого в медико-биологических исследованиях, создание научной школы по применению для лечения ряда серьезных заболеваний миллиметрового излучения). В конце 80-х годов медико-биологические программы были разработаны на кафедрах ФЭ в Рязани, Каунасе, Ленинграде. Отрадно видеть, что это направление достойно представлено на нынешней конференции. Велики возможности ФЭ в этом деле, но велики и сложности, связанные с кумулятивностью действия, долговременностью процессов, их многопараметричностью.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главным вопросом в науке всегда являлся вопрос уровня подготовки ученых. Особенности ФЭ требуют специалистов широкого профиля, экспериментаторов с большим теоретическим багажом и теоретиков, глядящих в перспективу использования научных достижений. Главными центрами нашей науки долгие годы были три республики: Россия, Украина, Узбекистан. Мощная и разветвленная ташкентская школа физэлектронщиков, имеющая богатый опыт и традиции, всегда отличалась умением контактировать со многими научными центрами и организовывать так необходимые для стимулирования развития науки собрания ученых. Нынешняя конференция — последний пример. Я желаю ей успешной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петров Н.Н.* // Проблемы физической электроники. Л.: ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 1986. С. 7–19.
2. *Электроника* // Энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия, 1991. С. 584.

## ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Эта публикация представляет собой авторский конспект последнего, ранее неопубликованного доклада, который сделал на I Конференции по Физической электронике в г. Ташкенте (Узбекистан) Заслуженный деятель науки РФ, проф. Н.Н. Петров (1931–1998). Николай Николаевич Петров возглавлял ведущую в СССР и РФ кафедру физической электроники в ЛПИ (СПбГТУ) на протяжении более четверти века (1971–1998). Заслуга проф. Н.Н. Петрова, прежде всего, в том, что он опроверг представление о физической электронике как только об эмиссионной электронике и доказал, что это — основополагающая наука, обеспечивающая физическую базу развития всех ветвей электроники.

В публикуемой работе дано, на наш взгляд, самое точное на сегодняшний день определение физической электроники как науки, проведен исторический экскурс, дан глубокий анализ решаемых в настоящее время проблем, а также поставлены задачи, над которыми должны работать в настоящее время и ближайшем будущем специалисты в области физической электроники.

Представление Николая Николаевича о физической электронике как науке основополагающей подтверждается и тем, что практически во всех лабораториях ИАиП РАН, в том числе по тематике, казалось бы, достаточно далекой от классической физической электроники (экология, математическое моделирование), успешно работают выпускники кафедры, которую он возглавлял.

Рукопись подготовил к публикации с.я.с. ИАиП РАН В.Н. Петров.

*Санкт-Петербургский государственный технический университет*

Материал поступил в редакцию 23.02.1999.

## PHISICAL ELECTRONICS AND HIGH TECHNOLOGIES

**N. N. Petrov**

*Saint-Petersburg State Technical University*

A modern definition of the physical electronics science is given in this publication, the history of its formation is outlined and the results of its development by the end of the 20<sup>th</sup> century are summarized. The most recent trends for the nearest future are defined and the main line of its further development, namely, the physics of active (working) media of electronics that control (support) functioning of various man-made systems (including biological objects) is justified.