

# ЭЛЕКТРОНИКА – ЭТО ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ НАУКА

Рассказывает академик Ю.В.Гуляев



Казалось бы, очевидно и общеизвестно: все достижения электроники, весь этот глобальный бизнес, целиком и полностью зиждется на фундаментальных научных исследованиях. Однако в многочисленных выступлениях и публикациях, посвященных "приоритетным направлениям развития отечественной электроники", говорится о чем угодно, только не об организации фундаментальных работ. В "Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 гг." на такое направление, как "Элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров, материалы для микро- и наноэлектроники, микросистемная техника, твердотельная электроника" РАН в 2012 году предусматривалось финансирование в размере 282352 млн. руб., т.е. порядка 7 млн. долл. На направление "Опто-, радио- и акустоэлектроника, оптическая и СВЧ-связь, лазерные технологии" в том же году – 76,389 млн. руб. (2,5 млн. долл.). Иными словами, в масштабах всей страны по линии РАН государство готово поддерживать научные исследования по названным направлениям в количестве одного-двух десятков хороших измерительных приборов или одной хорошей экспериментальной установки. Конечно, финансирование фундаментальных исследований не ограничено этой программой, но не свидетельствуют ли подобные показатели о некоем принижении роли фундаментальной науки со стороны тех, кто планирует государственные инвестиции? А может, они правы? Действительно, какова отдача от вложений в фундаментальные исследования, насколько они важны практически? Об этом – наш разговор с членом Президиума РАН, руководителем секции вычислительных, локационных, телекоммуникационных систем и элементной базы Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, директором Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН академиком Юрием Васильевичем Гуляевым.

**Юрий Васильевич, насколько важна связь современной электроники и фундаментальной физики?**

Электроника как таковая – это фундаментальная наука, имеющая в качестве объектов изучения взаимодействия электронов и атомов. У нее есть прекрасная и чрезвычайно важная для человечества прикладная часть, но в целом электроника – это раздел физики. И поэтому все новые веяния в электронике появляются исключительно – подчеркну, исключительно – на основе фундаментальных исследований в области физики твердого тела, физики конденсированных состояний в целом, физики вакуума и других смежных областей физики. Исследования в области твердотельной электроники, вакуумной электроники, оптоэлектроники и т.п. – это самая высокая фундаментальная физика. Поэтому вопрос о связи электроники и фундаментальной физики вообще не стоит – это просто одно и то же. Один из наиболее ярких примеров – работы в области углеродных нанотрубок (УНТ) и связанный с этим прорыв в области вакуумной электроники.

**Как связаны углеродные нанотрубки и вакуумная электроника?**

Многие считают, что сегодня актуальна только твердотельная электроника. Ничего подобного. Развитие происходит по спирали, все возвращается, только на более высоком уровне. Электроника начиналась с вакуумных приборов. Потом в большинстве применений в конце 1940-х – начале 1950-х годов им на смену пришли твердотельные приборы – транзисторы. Но для вакуумной электроники оставалась ниша – мощные приборы. В вакуумных приборах нет рассеяния электронов на примесях и дислокациях, нет электрон-фононного взаимодействия с кристаллической решеткой – всех тех эффектов, которые ведут к выделению тепла и препятствуют увеличению

мощности прибора. Поэтому в вакуумных приборах можно получать очень большие мощности. Все сверхмощные радиолокаторы в мире работают исключительно на вакуумных приборах. Кроме того, вакуумные приборы в значительно меньшей степени подвержены влиянию радиации, они допускают гораздо более высокие рабочие температуры. Конечно, нельзя интегрировать миллионы вакуумных приборов на одном квадратном сантиметре, как в случае полупроводниковых ИС. Там безраздельно доминируют твердотельные технологии.

Но сейчас начинается новый подъем в области вакуумных приборов. Он связан с наноприборами, в частности – с углеродными нанотрубками. В развитии этого направления существенна роль Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (ИРЭ РАН). Я и мои сотрудники предсказали возможность эмиссии электронов из УНТ и впервые экспериментально подтвердили это еще в 1993 году. В 1994 году мы доложили результаты на конференции в Гренобле, в этой области наш приоритет общепризнан.

*Все новые веяния в электронике появляются исключительно – подчеркну, исключительно – на основе фундаментальных исследований*

Важно отметить, что мы одними из первых в мире получили и исследовали УНТ. В 1985 году Р.Керл, Х.Крото и Р.Смолли с коллегами, объясняя результаты своих экспериментов по лазерной абляции графита, предсказали существование фуллеренов – углеродных макромолекул шарообразной формы, например, C<sub>60</sub> или C<sub>76</sub>. За это в 1996 году они были удостоены Нобелевской премии по химии. В 1991 году сотрудник Института

химической физики РАН, мой близкий друг, Л.А.Чернозатонский показал, что фуллерен можно получить в виде эллипсоида. Он назвал такую форму барреленом – от баррель, бочка. Мы много обсуждали его работу, и он теоретически показал, что можно сформировать и трубку. Эту формацию он назвал тубеленом. Мы попросили сотрудницу ИРЭ РАН Зою Ярославовну Косаковскую, прекрасного экспериментатора, получить такие трубки. Что она и проделала, направив мощный электронный пучок на графитовую пластину. Возможно, она первой в мире целенаправленно вырастила одностенные УНТ. Это было в 1991 году, статья была опубликована в начале 1992 года\*. Мы тогда не знали, что в конце 1991 года аналогичную работу опубликовал японский исследователь Ииджима – он формировал нанотрубки в дуге электрического разряда\*\*.

### Одно из наиболее значимых направлений эмиссионных приборов на углеродных нанотрубках – дисплеи

**Работы по УНТ – это фундаментальное научное достижение. Удалось ли получить практические результаты?**

Сегодня на УНТ уже придумано и отчасти реализовано достаточно много приборов. Причем не только эмиссионных, но и чисто твердотельных. Уже разработаны аналоги вакуумных приборов на УНТ – лампы бегущей волны, магнетроны, клистроны

и другие, с рабочими частотами на уровне терагерц. Это будут самые высокочастотные приборы, потому что электрон в вакууме движется без столкновений и его скорость может быть существенно выше, чем в твердом теле.

Одно из наиболее значимых направлений эмиссионных приборов на УНТ – дисплеи. Если сформировать матрицу из автоэмиссионных катодов на основе нанотрубок и покрыть экран люминофором, получится дисплей. По сравнению с жидкокристаллическим дисплеем, он в несколько раз более яркий и при этом потребляет меньше энергии. В Саратове есть филиал ИРЭ РАН, мы тесно сотрудничаем с НИИ "Волга" в области средств отображения информации уже не одно десятилетие. Недавно вместе с этим предприятием мы представили дисплей с диагональю 18 см (7 дюймов). Конечно, это опытный образец.

Нужно сказать, что аналогичные работы ведет компания Samsung. В начале 1990-х годов финансирование нашего института упало в 20 раз, не лучше была ситуация и в промышленности, каждый выживал, как мог. Тогда НИИ "Волга", которому мы передавали результаты своих фундаментальных достижений, начал работать по договорам с компанией Samsung. Они разрабатывали дисплеи для Samsung на основе наших работ. Как результат, в мае 2012 года компания Samsung на всемирной выставке в Бильбао представила телевизор с 38-дюймовым дисплеем на принципе эмиссии электронов из УНТ. Однако наш приоритет они признают. Разумеется, мы тоже будем продолжать развивать направление дисплеев на основе УНТ.

**Но ведь направлению дисплеев на автоэмиссионных катодах уже очень много лет, как и работам в области вакуумных интегральных схем. Почему применение нанотрубок**

\* Косаковская З.Я., Чернозатонский Л.А., Фёдоров Е.А. Нановолоконная углеродная структура. – Письма в ЖЭТФ, 1992, т.56, вып.26.

\*\* Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. – Nature, 7 November 1991, v.354, p.56–58.

**выводит такие приборы на принципиально новый уровень?**

Конечно, идея эта не нова. Но раньше в качестве катодов-эмиттеров использовались, как правило, кремниевые, вольфрамовые или молибденовые острия. Однако поскольку напряженность поля на острие очень высока, при работе такого прибора атомы отрываются от острия, острие затупляется, эмиссия падает. Это кардинально сокращает срок службы приборов, поэтому они и не получили развития. В случае катодов в виде УНТ ситуация принципиально иная. Во-первых, УНТ – это трубка, атомы могут улетать, но диаметр трубки при этом не увеличивается. Кроме того, УНТ – это макромолекула. Если она выращена на графитовой подложке, то процесс диффузии атомов с трубки обратим – сколько их улетает, столько и возвращается, т.е. эти структуры практически вечные.

Также важно понимать, что острие в виде УНТ гораздо более тонкое, диаметром порядка 10 нм. В идеальном случае на конце нанотрубки формируется полусфера – половина фуллерена. Но в реальности это происходит не всегда, трубка как бы обламывается, образуя "острые" концы. Так что диаметр острия в виде УНТ может составлять даже не 10, а 1 нм. Поэтому УНТ и обладают столь большой эмиссионной способностью. Сейчас опытные образцы наших приборов на основе УНТ демонстрируют плотность тока до 100 А/см<sup>2</sup>! Это абсолютно новое слово в электронике. Конечно, при такой плотности тока структура существует секунды – слишком много тепла выделяется, трубки сгорают. Но для дисплея таких мощностей и не нужно, там достаточно 10 мкА/см<sup>2</sup>.

**Каковы перспективы перехода от опытных образцов дисплеев на УНТ к серийной продукции?**

Внедрение этих приборов сталкивается с большими трудностями – не только

в России, но и за рубежом. Сегодня в области телевизионных дисплеев весь мир ориентирован на ЖК- и плазменные панели. Они относительно дешевые и всех устраивают. Экраны же на основе УНТ, аналогичные тем, что продемонстрировала компания Samsung, на порядок дороже. Конечно, когда такая

**Для фундаментальных работ в области нанoeлектроники в Москве создан новый Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН**

технология станет массовой, цена упадет. Но для начала нужны области применения, где преимущества дисплеев на УНТ, например, высокая яркость при низком энергопотреблении, окажутся решающими. Такими приложениями могут стать портативные устройства – планшетные компьютеры, смартфоны и КПК, фото- и видеокамеры, профессиональные индикаторные панели, например, в авионике и т.п. Подобные экраны можно делать гибкими, сейчас мы над этим работаем.

**Возможно ли в России серийное производство дисплеев на основе УНТ?**

Сегодня для фундаментальных работ в области нанoeлектроники в Москве создан новый Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН. Три года я был его директором-организатором, а сегодня Институт возглавляет мой коллега, чл.-кор. РАН А.Н.Сауров. Мы уже построили два здания, оснастили их уникальным оборудованием. Причем изначально поставили задачу – обеспечить институт самыми высокими технологиями, поскольку только на их основе и можно развивать современную физику. И, конечно, одно из первых направлений работ этого института – углеродные нанотрубки.

Один из корпусов нового института мы планируем использовать как опытный завод. Там возможно начинать выпуск дисплеев на УНТ. Если на опытном производстве удастся показать преимущества новых дисплеев, встанет вопрос о создании серийного завода. Пока таких предприятий в России нет.

Но работы в области углеродных нанотрубок – лишь один из примеров того, как результаты сугубо научных исследований приводят к появлению новых прикладных направлений электроники.

**Вы широко известны в науке работами в области акустоэлектроники. Термин "волны Блюстейна-Гуляева" более полувека назад вошел в научный оборот. Акустоэлектроника – еще один пример коммерциализации результатов фундаментальных исследований?**

Акустоэлектронные приборы – это дело моей жизни. Если говорить о коммерциализации этого направления, то только в 2011 году объем выпуска аку-

*Только в 2011 году объем выпуска акустоэлектронных приборов в мире превысил 18 млрд. долл.*

стоэлектронных приборов в мире превысил 18 млрд. долл. А одни из первых патентов на фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) получили три специалиста – Ю.В.Гуляев, А.С.Багдасарян и А.М.Кмита. У нас 18 патентов в разных странах. ПАВ-фильтры установлены в каждом сотовом телефоне, телевизоре, автомобильном приемнике и т.д. А это далеко не единственный вид акустоэлектронных приборов. В их номенклатуру входят и устройства свертки

и корреляции сигналов, и линии задержки, и синтезаторы частоты, и различные сенсоры, и многие другие приборы. Разумеется, здесь заложена огромная фундаментальная составляющая. И работы в этом направлении не прекращаются.

Пожалуй, один из самых ярких примеров – радиочастотные метки или радиочастотные устройства идентификации (RFID). Фильтр на ПАВ можно превратить в кодер, сформировав на подложке несколько отражающих элементов с определенным интервалом, аналогично штрихам на штрих-коде. В результате метка формирует уникальный отклик, который может быть легко распознан. Мы можем, например, различить десяток предметов в одной корзине с расстояния в 20–30 м.

Конечно, RFID делают на основе различных технологий. И для каждого типа RFID-меток есть своя область применения. Акустоэлектронная метка абсолютно пассивна, не требует никакого питания, работает в самых тяжелых условиях с точки зрения температуры, радиации и т.п. Конечно, по чувствительности она уступает меткам на основе активных компонентов. Однако при движении с высокой скоростью данные с ПАВ-меток считываются гораздо легче. Это важно, например, если нужно отслеживать грузы, перевозимые по железной дороге. Поэтому нашими RFID-метками на ПАВ уже заинтересовалась компания "РЖД", ими, мы надеемся, будут оснащаться все железнодорожные вагоны в стране. Разумеется, все эти метки будут соответствовать требованиям международных стандартов на RFID.

Отмечу, что самих по себе меток недостаточно – нужны еще считыватели. Если цена самих меток – центы, то считыватели стоят порядка 5–6 тыс. долл. Их мы совместно с предприятиями электронной промышленности тоже разрабатываем и поставляем. В целом мы готовы

разработать и изготовить систему из считывателей и меток в интересах любого заказчика, с учетом его специфических требований.

Разумеется, RFID на ПАВ разрабатывают и выпускают сегодня многие компании в мире. Примечательно, что одну из таких фирм GVR Trade SA по разработке ПАВ-устройств, в том числе RFID, основал в Швейцарии мой ученик Виктор Петрович Плесский. Этот специалист широко известен в мире, пользуется заслуженным авторитетом в области акустоэлектронных устройств.

**Вы возглавляете Научно-исследовательский центр электронных диагностических систем "ЭЛДИС". Медицинская электроника - это еще одна область приложения результатов фундаментальных исследований?**

В области медицинской электроники я работаю последние 30 лет. Для ИРЭ РАН это одно из важных направлений, мы создаем достаточно уникальные приборы. Например,

*Если рентгеновский маммограф стоит около полумиллиона долларов, наш прибор – 20 тыс. долл.*

совместно с моим заместителем В.А.Черепениным и его сотрудниками мы создали и развили новый вид компьютерной томографии – электроимпедансную компьютерную томографию (ЭИКТ). В отличие от других видов компьютерной томографии (рентгеновской, на основе ядерного магнитного резонанса, позитронно-эмиссионной и др.) мы предложили измерять электрический импеданс тканей. Он изменяется при всех патологиях. Мы научились на основе измерений

на поверхности получать трехмерное распределение электропроводности внутри тела. Уже выпускается электроимпедансный маммограф, который дает такие же результаты, что и рентгеновский маммограф. Только он абсолютно безвреден. Мы используем ток на уровне 50 мкА, что сопоставимо с естественными токами в теле. Но если рентгеновский маммограф стоит около полумиллиона долларов, наш прибор – 20 тыс. долл. Около 500 клиник страны – в основном частных – приобрели этот прибор. Государственные медицинские учреждения предпочитают покупать дорогой рентгеновский аппарат. Только что завершились клинические испытания аналогичного прибора для диагностирования рака шейки матки, скоро он пойдет в производство.

Другая наша разработка, совместно с Ю.В.Масленниковым (компания "НПО "КРИОТОН") – магнитный кардиограф. Он измеряет магнитное поле сердца. Напряженность этого поля в 10 млн. раз ниже напряженности магнитного поля Земли, которое в среднем составляет порядка 0,5 Э. Тем не менее, мы умеем его измерять. Десять таких приборов уже купили клиники Германии, Ю.Кореи, США, Финляндии. Два прибора приобретены для клиник Москвы.

**Вы продолжаете работы в области именно фундаментальных исследований, связанных с электроникой?**

Разумеется. Сегодня мы занимаемся перспективными направлениями, такими как наноэлектроника, нанофотоника, спинтроника, исследования метаматериалов и т.п. Сотрудничаем со многими научными организациями и промышленными предприятиями. Во многих направлениях о конкретных результатах говорить пока рано, но они непременно придут.

**Спасибо за интересный рассказ.**

*С Ю.В.Гуляевым беседовал И.В.Шахнович*