

Лекция 1.

Радиофизика. Историческое введение.

«Радиофизика» — раздел физики, занимающийся изучением общих закономерностей генерации, передачи, приема, регистрации и анализа колебаний и волн различной физической природы и разных частотных диапазонов, а также их применением в фундаментальных и прикладных исследованиях.

Общность изучаемых радиофизических закономерностей излучения, распространения, взаимодействия и трансформации колебаний и волн в различных средах, в том числе в неоднородных, нелинейных и нестационарных, позволяет использовать радиофизические методы как универсальное средство исследования окружающей среды на самых различных уровнях: от микромира до космического пространства.

Современная радиофизика является результатом деятельности многих естествоиспытателей, ибо «в мире мысли, как и в материальной природе, нет произвольного зарождения, а существует только развитие, эволюция. Современная мысль возникает на неосознаваемом фоне идей, переданных нам предшествующими поколениями» (Н. А. Умов).

Совершим краткий экскурс, проследив эволюцию представлений о существовании электромагнитных волн, исследовании их свойств и практических применений.

Одним из первых естествоиспытателей, заложивших основы радиофизики, должно быть названо имя *Майкла Фарадея*, самоучки, ставшего профессором Королевского института в 30 лет. В **1831** году он формулирует закон электромагнитной индукции:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

В **1832** году высказывает предположение о существовании электромагнитных волн и их распространении с конечной скоростью. Это предположение, изложенное в труде «Новые воззрения, подлежащие в настоящее время хранению в запечатанном конверте в архивах Королевского общества», было обнаружено в этих архивах в 1938 году.

1853 год — *Уильям Томсон (лорд Кельвин)* увековечил свое имя исследованиями резонанса в колебательном контуре и связал значение резонансной частоты с параметрами контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

1873 год — *Джеймс Клерк Максвелл* в «Трактате об электричестве и магнетизме» предсказывает существование электромагнитных волн в открытом пространстве. Его фундаментальный труд характеризует высказывание: «Нет ничего более практичного, чем хорошая теория».

1887 год — *Генрих Герц* создает источник электромагнитных волн — вибратор Герца, а в **1888** году экспериментально подтверждает теорию Максвелла, регистрируя существование электромагнитных волн и устанавливая их основные свойства — наличие поляризации, законы отражения и преломления, интерференции. Эксперименты проведены с большой изобретательностью. Закон преломления был исследован с использованием призмы из асфальта с ребром в 1 м, а установленную зависимость интенсивности принимаемого излучения от взаимного расположения металлической печи, находящейся в комнате, где проводились опыты, и приемника излучения можно отнести к началам радиолокации.

По мнению самого Г. Герца, все эти результаты обладали малой практической значимостью.

1890 год — *Лехер* исследует скорость распространения электромагнитных волн в двухпроводной линии и устанавливает ее значение

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}.$$

Англичанин *Э. Бранли* и француз *О. Лоджи* независимо создают детектор электромагнитных волн — когерер — прибор, проводимость которого меняется под действием электромагнитного поля. Он представляет собой стеклянную трубку с металлическими выводами, заполненную опилками железа.

1892 год — *А. Риги* создает генератор электромагнитных волн с длиной волны $\lambda = 7,5$ и 20 см, используя сферический резонатор.

Проведенные исследования позволяют заключить, что радиоволны отличаются от световых не природой, а длиной волны.

Установленные законы генерации и распространения электромагнитных волн находят практические применения.

1888—1889 годы — минный инженер *Александр Степанович Попов* высказывает идеи об использовании электромагнитных волн для передачи сигналов на расстояние и повторяет опыты Герца.

1 мая **1885** года — на заседании Русского физико-химического общества А.С. Попов демонстрирует прибор для передачи сигналов на расстояние, «как только будет найден источник электромагнитных колебаний, обладающих достаточной энергией».

1896 год — итальянец *Гулиелмо Маркони* патентует способ передачи сообщений с помощью электромагнитных волн и в 1909 году вместе с *Карлом Фердинандом Брауном* получает Нобелевскую премию

В **1900** году устанавливается радиотелеграфная связь между Европой и Америкой.

1904 год — на смену когереру приходит новый детектор электромагнитных волн — вакуумный диод, изобретенный *Джоном Флемингом*.

1905 год, май — русско-японская война. Эскадра адмирала Рождественского перехвачена в Цусимском проливе эскадрой адмирала Того, полу-

чившего радиосообщение о приближении противника. К этому времени русские военные корабли тоже были оснащены радиостанциями и по усилению активности японских радиостанций в эфире, можно было заключить, что эскадра Рождественского обнаружена. **Этот эпизод является первым примером использования радио в военных целях.**

1905 год — американская компания Quintad Iron Works, Boston создает радиоуправляемую торпеду и... продает эту разработку Японии «в силу малого военного значения».

1906 год — *Ли де Форест* создает вакуумный усилительный элемент — триод — прообраз твердотельного аналога — транзистора.

1913—1914 годы — *Николай Дмитриевич Папалекси* создает ламповый генератор электрических колебаний.

1925—1928 годы — адмирал *Аксель Иванович Берг* и одновременно и независимо голландский ученый *Балтазар Ван дер Поль* разрабатывают теорию лампового генератора.

1929—1930 годы — будущий академик *А. А. Андронов* развивает теорию автоколебательных систем. Под его руководством строятся первые советские радиостанции мощностью до 500 кВт.

1932 год — *Д. А. Рожанский* формулирует принцип группировки или фазовой синхронизации электронных пучков, положенный позднее в основу построения генераторов СВЧ колебаний — клистронов, магнетронов и др., а также ускорителей — циклотронов, синхротронов,...

1935 год — *Ю. Б. Кобзарев* начинает работы по созданию в СССР радиолокационных систем.

Мощным толчком в развитии радиофизики и ее элементной базы — физической электроники явилась Вторая Мировая война.

Для бомбардировок Великобритании немецкая армия наряду с обычными самолетами использовала новые системы вооружения: «оружие возмездия» — ракеты ФАУ-1 и ФАУ-2. Эффективная борьба с ними стала возможной благодаря развитию в Великобритании систем импульсной радиолокации, сердцем которой стал изобретенный там же магнетрон. Создание малогабаритных радиолокационных станций позволило оснастить ими истребительную авиацию, создать ночные истребители.

Одновременно с этим разрабатывались и системы управления огнем зенитной артиллерии. Работая над созданием этих систем, *Клод Шеннон* и *Норберт Винер* закладывают основы кибернетики. Разрабатываются шифровальные и счетно-решающие машины. На начальном этапе в качестве бистабильных элементов в них используют электромагнитные реле. На смену им приходят более быстросрабатывающие вакуумные триоды.

В США начинается разработка атомного проекта Манхэттен. Для расчетов, необходимых при создании атомной бомбы, создается электронная вычислительная машина — «ЭНИАК». Она содержит около 18 000 вакуумных триодов и потребляет около 40 кВт электроэнергии.

Развитие техники радиолокации приводит к бурному развитию техники СВЧ. Потребности в вычислительной технике требуют создания менее энер-

гоемких бистабильных элементов — твердотельных аналогов вакуумных усилительных элементов.

1947 год — сотрудники Беллловской лаборатории *Уильям Шокли*, *Джон Бардин* и *Уильям Браттейн* в поисках твердотельного аналога вакуумного триода обнаруживают усилительный эффект в полупроводниковой структуре с точечными контактами, позднее названной биполярным транзистором. В 1956 году эта работа была отмечена Нобелевской премией. По сути она совершила переворот в технике обработки информации, в развитии цивилизации.

Необходимо отметить, что идея транзистора, правда полевого, была изложена в **1928** году в пяти(!) патентах на создание твердотельного триода, полученных американцем польского происхождения *Лиуиенфельдом*. Реализация его идей оказалась в то время невозможной из-за отсутствия понимания процессов, происходящих на поверхности полупроводников, невозможности их контроля в силу неразвитости соответствующей технологии. Транзистор, аналогичный американскому, был создан практически одновременно, с годичной задержкой, и независимо в Европе в ходе работ по повышению чувствительности детекторов немецких радиолокационных станций. Однако патент был уже получен американскими учеными.

1954 год — *Н. Г. Басов*, *А. М. Прохоров* создают и исследуют мазер и в 1964 году вместе с *Ч. Таунсом* получают Нобелевскую премию за создание лазера.

1959 год — *Джон Килби* патентует идею создания интегральной полупроводниковой схемы. В 2000 году эта революционная и вполне естественная идея отмечается Нобелевской премией.

1960 год — *Мейман* создает газовый HeNe лазер. Радиофизика переходит к освоению оптического диапазона электромагнитных волн.

1962 год — создан полупроводниковый *GaAs* лазер, открыт эффект *Ганна*, *Лео Эсаки* создает туннельный диод; благодаря созданию мощных источников оптического излучения развивается нелинейная оптика; открыт эффект *Джозефсона*, эффект высокотемпературной сверхпроводимости в керамических материалах. *Биннинг* и *Рёрер* создают новое направление в изучении свойств материалов на мезоскопическом уровне — сканирующую зондовую микроскопию, позволяющую в настоящее время манипулировать отдельными атомами. За исключением эффекта Ганна все эти открытия удостоены Нобелевской премии.

В 2000 году Нобелевская премия присуждается американцу *Джону Килби* — создателю интегральной схемы, россиянину *Жоресу Алферову* и немецкому ученому *Герберту Крёмеру* за создание полупроводниковых гетероструктур для быстродействующих интегральных схем и оптоэлектроники.

Человечество вошло в новую эру информационных и коммуникационных технологий, используя достижения микроэлектроники, нелинейной и интегральной оптики, криоэлектроники, перенося идеи радиофизики в микроволновый и оптический диапазоны. В своем развитии человечество непрерывно познает окружающий мир, стремясь понять устройство органов жиз-

недеятельности живых существ и создать их аналоги. Это относится к органам зрения насекомых, устройствам их ориентации в пространстве и многим другим загадкам природы, решать которые помогает радиофизика — основной инструмент изучения тайн природы.

Развитие технологии микроэлектроники вывело процесс познания на новые рубежи — рубежи нанотехнологий. Возникли новые области науки и техники: МЕМС — микро-электро-механические системы (миниатюрные искусственные насекомые, крошечные роботы).

ОМЕМС — опто-микро-электро-механические системы.

Молекулярно-пучковая эпитаксия позволяет создавать материалы с заданными свойствами, например, с нужной шириной запрещенной зоны, нужной постоянной кристаллической решетки. Можно получать материалы, однородные по электрическим, оптическим и другим свойствам.

Контроль параметров материалов можно осуществлять с помощью разнообразных методов. Например, наблюдая дифракцию электронов на поверхности кристаллической решетки. Можно «потрогать» волновую функцию атомов с использованием сканирующего зондового микроскопа, заменить один атом в кристаллической решетке другим. Все это становится возможным благодаря развитию измерительных систем, основанных на знании законов радиофизики, методов формирования и обработки сигналов.