



Московский
педагогический
государственный
университет



В. А. Ильин
В. В. Кудрявцев

ИСТОРИЯ РАДИОФИЗИКИ



Москва 2017



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский педагогический государственный университет»



В. А. Ильин, В. В. Кудрявцев

ИСТОРИЯ РАДИОФИЗИКИ

Модульный курс для магистров

Учебное пособие

МПГУ
Москва • 2017

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3гя73
И46

Рецензенты:

Григорий Наумович Гольцман, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Московского педагогического государственного университета (МПГУ), руководитель Учебно-научного радиофизического центра факультета физики и информационных технологий МПГУ

Пётр Иванович Самойленко, член-корреспондент Российской академии образования (РАО), доктор педагогических наук, профессор кафедры физики Московского государственного университета технологий и управления им. К. Г. Разумовского

Ильин, Вадим Алексеевич.

И46 История радиофизики. Модульный курс для магистров : Учебное пособие / В. А. Ильин, В. В. Кудрявцев. – Москва : МПГУ, 2017. – 320 с. : ил.

ISBN 978-5-4263-0482-6

Модульный курс знакомит студентов с основополагающими вехами развития радиофизики как науки. В нем рассказано как об истории становления и современных достижениях радиотехники, радиоспектроскопии, твердотельной и квантовой электроники, лазерной спектроскопии, физики и техники терагерцового излучения, радиоастрономии, так и о научной деятельности ряда выдающихся ученых-радиофизиков. Исследование истории радиофизики проводится в контексте самой престижной научной награды – Нобелевской премии. Кроме того, представлен достаточно обширный материал, посвященный истории развития отечественной радиофизики.

Модульный курс предназначен для обучения магистров по направлениям подготовки 511500 Радиофизика и 011200 Физика. Его можно использовать также и для обучения по направлению 050100 Педагогическое образование (квалификация «магистр») при подготовке будущих учителей к осуществлению исторического подхода к преподаванию физики в школе. Издание может быть также рекомендовано всем интересующимся вопросами истории и методологии науки.

**УДК 53 (075.8)
ББК 22.3гя73**

ISBN 978-5-4263-0482-6

© МПГУ, 2017
© Ильин В. А.,
Кудрявцев В. В., текст, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Модуль № 1. История радиофизики – важнейшее направление истории науки	7
1.1. Предмет, методы и аспекты радиофизики	7
1.2. Периодизация исторических этапов развития радиофизики	12
1.3. Нобелевские премии в области радиофизики	14
Модуль № 2. Исторический обзор развития радиотехники и вакуумной электроники	25
2.1. Беспроволочная телеграфия	25
2.2. Радиотехника незатухающих колебаний	37
2.3. Вакуумная (ламповая) электроника	42
Модуль № 3. Исторический обзор развития радиоспектроскопии ..	53
3.1. Резонансные методы исследований	53
3.2. Микроволновая спектроскопия	71
Модуль № 4. Исторический обзор развития твердотельной и квантовой электроники	83
4.1. Изобретение мазера и лазера	84
4.2. Изобретение транзистора	91
4.3. Создание интегральной схемы и рождение микроэлектроники	96
4.4. Гетероструктурные полупроводники и приборы на их основе	102
4.5. Гетеросистемы пониженной размерности	113
4.6. Современные направления квантовой электроники	117
Модуль № 5. Исторический обзор развития лазерной спектроскопии	146
5.1. Лазерное охлаждение атомов	149
5.2. Прецизионная лазерная спектроскопия	157
Модуль 6. Исторический обзор развития физики и техники терагерцового излучения	166
6.1. Источники терагерцового излучения	166
6.2. Приемники терагерцового излучения	170
6.3. Области применения устройств, использующих терагерцовое излучение	174

Модуль № 7. Исторический обзор развития радиоастрономии	180
7.1. Открытие космического радиоизлучения. Создание первого радиотелескопа	181
7.2. Разработка метода апертурного синтеза. РСДБ	186
7.3. Современные радиотелескопы и РСДБ	194
7.4. Открытие реликтового излучения и его анизотропии	199
7.5. Обнаружение квазаров, пульсаров и двойных пульсаров.	213
7.6. Радиоастрономия и проблема SETI.	224
Модуль № 8. Исторический обзор развития отечественной радиофизики	233
8.1. Первые отечественные радиофизические центры	233
8.2. Научные школы в области теории нелинейных колебаний	244
8.3. Научные школы в области радиолокации	258
8.4. Научные школы в области радиоастрономии.	268
8.5. Эволюция радиофизической школы МПГУ	283
Заключение.	294
Приложения	296
1. Методические рекомендации к изучению модульного курса	296
2. Список рекомендуемой литературы	301
3. Задания для самостоятельной работы	315

Введение

Традиционно под радиофизикой понимают раздел физики, в котором изучают физические основы радиотехники и электротехники, в том числе физические процессы, связанные с электромагнитными колебаниями в радиодиапазоне. Однако в настоящее время радиофизика пронизывает практически все сферы человеческой деятельности. Ее методы широко используются в астрономии (изучение космических объектов путем анализа приходящего от них радиоизлучения), в планетологии (радиолокация планет и их спутников), в спектроскопии атомов и атомных ядер (использование резонансных методов исследования, методов лазерной спектроскопии и др.), в физике низких температур (лазерное охлаждение микрочастиц и бозе-эйнштейновская конденсация атомов), в химии и медицине (ЯМР-спектроскопия, ЯМР-томография), в дистанционном мониторинге Земли и Мирового океана и т. д.

В силу стремительной дифференциации радиофизической науки и активной экспансии ее методов в другие области науки и техники сегодня принята более общая трактовка этой дисциплины. Академик РАН А. В. Гапонов-Грехов характеризует предмет современной радиофизики следующим образом. «Это – наука о колебаниях и волнах разной физической природы. Она включает в себя возбуждение колебаний и волн в неравновесных средах и системах, их излучение и распространение, взаимодействие со средой, регистрацию и обработку колебательных и волновых сигналов. Радиофизика исследует колебания и волны разной физической природы: электромагнитные, звуковые, сейсмические, гравитационные и т. д.».

В связи с этим в книге будет представлен обзор важнейших достижений не только в области магистральных направлений радиофизических исследований (радиотехники, радиоспектроскопии, твердотельной и квантовой электроники, радиоастрономии), но также в физике и технике терагерцового излучения, в лазерной спектроскопии. Такой подход позволяет более глубоко проанализировать связи между различными физическими явлениями и процессами, выявить в них радиофизическую составляющую, продемонстрировать широкий спектр применений этой науки, исследовать эволюцию основополагающих радиофизических идей, устройств, методов.

Кроме того, при изложении материалов курса широко используется историко-физический подход, способствующий лучшему пониманию процессов возникновения и развития радиофизических идей и методов, не прибегая при этом к сложному математическому аппарату.

Для освоения содержания курса предусмотрены задания для самостоятельной работы, выполнение которых позволит студентам закреплять и обобщать полученные знания, подготавливать творческие работы (рефераты или компьютерные презентации) к семинарским занятиям по истории физики или к зачетам. Подобная деятельность способствует формированию у студентов ряда общекультурных и профессиональных компетенций.

Модульный курс может быть использован при чтении курса «История и методология физики», спецкурсов «Современная физика и астрофизика», «Нобелевские премии по физике» и др. Кроме того, он может читаться параллельно с изучением стандартного (теоретического) курса радиофизики и тем самым его удачно дополнять. Благодаря этому у студентов появляется возможность расширить свои знания в области истории этой науки, раскрыть межпредметные связи и методологические аспекты радиофизики.

Представленный в модульном курсе материал можно также изучать (в зависимости от учебных целей) в школе (в классах с углубленным изучением физики), применять в проектной деятельности, при подготовке тематических конференций.

Модуль № 1. История радиофизики – важнейшее направление истории науки

1.1. Предмет, методы и аспекты радиофизики

Стремительный взлет физической науки и инженерной мысли в конце XX – начале XXI в., их усиливающаяся интеграция свидетельствуют об успешной эволюции постнеклассической физики и ее магистральных направлений исследований. Одним из ярких тому примеров является развитие радиофизики – научной дисциплины, открытия и достижения которой (например, создание транзистора и интегральных схем, изобретение лазеров и др.) способствовали формированию и развитию постиндустриального (информационного) общества, расширению возможностей научного познания природы.

Радиофизика – раздел физики, предполагающий изучение и использование электромагнитных колебаний в интервале частот 10^4 – 10^{11} Гц (радиодиапазон): их возбуждение, распространение, прием и преобразование частот, а также возникающие при этом взаимодействия электрических и магнитных полей с зарядами в вакууме и в веществе.

Со временем радиофизические методы проникли и в другие диапазоны: от очень низких частот до γ -излучения, а также в область исследований волновых процессов неэлектромагнитной природы (например, в акустику). При этом наблюдается активное взаимопроникновение радиофизических представлений в другие области знания, и наоборот.

Радиофизика как наука сформировалась в 1930–1940-е гг. благодаря бурному развитию радиотехники, радиосвязи, радио- и телевидения и др. На первом этапе развитие радиофизики опиралось на классическую электродинамику, общую теорию колебаний и волн, электронику. Кратко охарактеризуем эти научные направления.

- *Классическая электродинамика*, в основе которой лежит электромагнитная теория Максвелла, обеспечила понимание процессов излучения, распространения и приема радиоволн. До сих пор уравнения Максвелла остаются краеугольным камнем теории радиотехнических устройств и систем.

- *Теория колебаний* создала математический аппарат, позволяющий исследовать процессы в колебательных системах и управлять ими. Важную роль сыграли исследования нелинейных колебаний (и особенно автоколебаний), лежащие в основе работы генераторов электромагнитных колебаний радиодиапазона. Благодаря исследованиям нелинейных колебаний, проведенных школой Мандельштама, наша страна стала общепризнанным центром исследований в этой области, а советская радиотехника, используя достижения радиофизики, добилась огромных успехов. Дальнейшее развитие радиофизики показало, что эти исследования имеют фундаментальный характер, так как современную радиофизику невозможно представить без нелинейных устройств.
- *Электроника* – наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется для преобразования электромагнитной энергии, в основном для передачи, обработки и хранения информации. Электроника зародилась в начале XX в. после создания основ электродинамики, исследования свойств термоэлектронной эмиссии, фотоэлектронной эмиссии, рентгеновских лучей, открытия электрона, создания классической электронной теории. В настоящее время электроника включает в себя три области научных исследований: вакуумную электронику, твердотельную электронику и квантовую электронику. Каждая область подразделяется, в свою очередь, на ряд разделов и направлений.

Итак, радиофизика, по меткому выражению В. И. Гапонова, «держится на трех китах: теории колебаний, электродинамике и электронике».

Особое место в обсуждении предмета и методов радиофизики занимает *радиотехника*, которая представляет собой один из наиболее ярких примеров технической дисциплины, сохранившей тесный контакт с физикой. Это объясняется прежде всего тем, что по своей сущности радиотехника имеет дело непосредственно с электродинамикой (вопросы излучения и распространения электромагнитных волн), с электроникой, электронной оптикой (электронные лампы, электронно-лучевые приборы) и с молекулярной физикой (газонаполненные

приборы, вопросы ионизации верхних слоев атмосферы). Однако в ряде важных случаев радиотехнике, так же как и другим отраслям техники, приходится покидать давно привычную почву линейных колебаний и заниматься нелинейными задачами. Эти и подобные им обстоятельства привели к выделению из физики научной дисциплины, называемой радиофизикой, которая выступает своеобразным соединительным звеном между физикой и радиотехникой.

Таким образом развитие радиотехники предопределило зарождение и развитие радиофизики. Однако весь тот комплекс вопросов, который дал основание выделять радиофизику как самостоятельную науку, был разработан значительно позже.

По мере развития радиофизики ее методы (например, радиотехнические методы, радиолокационный метод, резонансные методы исследования вещества, радиоинтерференционный метод, томографический метод др.) стали проникать в другие области физики. Возник процесс обратного взаимодействия. Новые задачи, а также освоение диапазонов высоких частот привлекли в радиофизику идеи и методы из других областей физики, в частности из оптики, что привело к появлению нового раздела радиофизики – квазиоптики (квазиоптические линии передачи, открытые резонаторы и др.). В свою очередь, радиофизические методы, развитые, например, для сантиметрового диапазона длин волн, проникнув в оптику, заметно расширили возможности последней, вызвав к жизни такие разделы, как волоконная оптика, голография, интегральная оптика и др., так что и оптический диапазон частот стал областью приложения методов радиофизики. Иногда это поясняют термином «радиооптика».

В результате взаимных «обогащений» с другими областями физики, с одной стороны, и обособления отдельных разделов – с другой, внутри радиофизики образовалось, кроме квазиоптики, несколько других важных «дочерних» направлений исследований: статистическая радиофизика, квантовая радиофизика (квантовая электроника), радиоспектроскопия, радиоастрономия, микроэлектроника и др. Из приведенного перечня весьма затруднительно определить собственно предмет радиофизики. Поэтому целесообразно выделить направления, позволяющие уточнить предмет радиофизики на каждом этапе ее развития. Предполагается, что радиофизика охватывает в основном два таких направления (по мнению С. М. Рытова).

1. Изучение физических явлений, существенных для радиофизики, т. е. для всех основных этапов радиосвязи, – генерация электромагнитных сигналов, излучение и распространение электромагнитных волн, прием радиосигналов. Это направление можно назвать *физикой для радио*.
2. Применение радиофизических методов в различных областях физики, астрономии, химии и др. Это направление может быть охарактеризовано как *радио для физики*.

Таким образом, развитие радиофизики сопровождается открытием новых явлений, находящих практическое применение и составляющих основу ее новых разделов. При этом некоторые разделы радиофизики выделяются в самостоятельные области физики (радиоастрономия, радиоспектроскопия и др.), где методы радиофизики служат лишь средством изучения явлений, лежащих за пределами радиофизики.

В настоящее время принято следующее определение предмета этой науки (формулировка академика РАН, основателя и первого директора Института прикладной физики А. В. Гапонова-Грехова). «Радиофизика – наука о колебаниях и волнах разной физической природы. Она включает в себя возбуждение колебаний и волн в неравновесных средах и системах, их излучение и распространение, взаимодействие со средой, регистрацию и обработку колебательных и волновых сигналов. Радиофизика исследует колебания и волны разной физической природы: электромагнитные, звуковые, сейсмические, гравитационные и т. д. Она включает в себя возбуждение колебаний и волн в неравновесных средах и системах, их излучение и распространение, взаимодействие со средой, регистрацию и обработку колебательных и волновых сигналов».

Будучи одним из краеугольных камней современной науки, радиофизика обладает научным, техническим и гуманитарным аспектами. Рассмотрим их подробнее.

Научный аспект радиофизики. Радиофизика – важнейший источник знаний об окружающем мире. Благодаря появлению таких радиофизических направлений исследований, как радиоспектроскопия, статистическая радиофизика, квантовая радиофизика (квантовая электроника), микроэлектроника, радиоастрономия и др., был осуществлен стремительный прорыв во многих областях современной науки.

Приведем лишь один пример. В последние десятилетия резонансные методы (область радиоспектроскопии) получили широкое распространение при исследовании вещества в разных агрегатных состояниях. Их можно отнести к наиболее чувствительным и точным методам исследования, которые активно используются в физике, химии, биологии и медицине. Каждое вещество имеет характерный только для него набор частот собственных колебаний (от 102 до 1022 Гц). Этот набор частот – своеобразная «визитная карточка» вещества, изучая которую можно распознать химический состав, структуру, симметрию и другие его характеристики.

Технический аспект радиофизики. Расширяя и многократно умножая возможности человека, радиофизика обеспечивает его уверенное продвижение по пути технического прогресса. Радиофизические методы широко используются в астрономии (изучение космического пространства и планет с помощью методов радиоастрономии), в спектроскопии атомов и атомных ядер (использование резонансных методов исследования, методов лазерной спектроскопии и др.), в метеорологии (изучения метеоритов, контроль за облачными и грозовыми фронтами и осадками), в геологии (поиск минеральных месторождений, определение состава земных пород и их структуры радиолокационными методами), в медицине (биорезонансная терапия, ЯМР-томография), в современных средствах связи и т. д.

Гуманитарный аспект радиофизики. Изучение процесса развития радиофизики и определение главных его закономерностей позволяют проследить эволюцию основополагающих радиофизических идей и выделить перспективные области развития радиофизики. Отметим, что приобщение к истории радиофизики означает не уход от актуальных проблем современности, а более глубокую ориентацию в них благодаря пониманию истоков и перспектив научно-технического прогресса.

Таким образом, в радиофизике в наибольшей степени представлены научный, технический и гуманитарный аспекты. Это предопределило ту исключительно важную роль, какую она играет в современном мире.

1.2. Периодизация исторических этапов развития радиофизики

Изучение радиофизики сквозь призму истории позволяет выявить значимость этой науки для развития научно-технического прогресса в XXI в., а также проследить эволюцию основополагающих радиофизических идей и теорий. Прежде всего, определим предмет истории радиофизики и установим ее хронологические рамки.

Предметом истории радиофизики является история зарождения, становления и развития радиофизики как научной дисциплины, которая вносит весомый вклад в формирование общечеловеческой культуры и современной фундаментальной науки.

Несомненно, предмет истории радиофизики – широкое понятие. Можно выделить, как минимум, три важнейших аспекта, его составляющих. Во-первых, это *физический аспект*. Для изучения истории радиофизики необходимо иметь естественнонаучное или техническое образование и обладать определенным запасом знаний по радиофизике. Во-вторых, это *исторический аспект*, предполагающий использование методов и принципов истории физики при изучении истории развития магистральных направлений радиофизики, научных биографий творцов радиофизики и т. д. Наконец, необходимо учитывать *социокультурный аспект* истории радиофизики, т. е. рассмотреть вклад радиофизики в развитие цивилизации, в частности Нобелевские премии за радиофизические открытия, многогранные связи радиофизики с другими областями знания, социальные последствия применения радиофизических идей (например, мобильной и спутниковой связи в телекоммуникационных системах) и др.

Целью истории радиофизики, как и любой исторической науки, является накопление и систематизация научных фактов в контексте определенных социокультурных явлений. К этой цели необходимо добавить исследование закономерностей, следуя которым развивается радиофизическая наука, что позволит спрогнозировать пути ее дальнейшей эволюции.

Одной из важных проблем в истории науки является ее периодизация, которая позволяет понять эволюцию основополагающих научных идей и методов, тенденции развития, движущие факторы, поворотные моменты, практические применения и социальные последствия. В развитии радиофизики можно выделить несколько этапов.

- 1) **Этап предистории радиофизики (середина XIX в. – 1930-е гг. XX в.).** Здесь речь идет о творцах теории электромагнитного поля (М. Фарадей, Дж. К. Максвелл, Г. Герц, О. Хевисайд, П. Н. Лебедев, Дж. Г. Пойнтинг и др.), пионерских исследованиях в области электросвязи гениальных дилетантов и ученых (М. Лумис, Д. Хьюз, А. Долбэр, А. Риги, Э. Томсон и др.), основополагающих работах по беспроволочной телеграфии (А. С. Попов, Г. Маркони, К. Ф. Браун и др.).
- 2) **Этап зарождения и становления радиофизики как науки (30–40-е гг. XX столетия).** На этом этапе развитие радиофизики опиралось на электродинамику, общую теорию колебаний и волн, электронику. Зарождение и становление радиофизики как науки предопределилось развитием радиотехники, в истории которой, в свою очередь, можно выделить несколько этапов. Первый из них – искровая радиотехника – начинается непосредственно с изобретения радиоприемника и создания систем радиосвязи. Начальным пунктом второго этапа следует считать создание в 1907 г. американским радиотехником Л. де Форестом электронной лампы – триода. Вторая мировая война стимулировала развитие микроволновой радиотехники и полупроводниковой электроники – третий этап в истории радиотехники.
- 3) **Этап дифференциации радиофизической науки (с 1950-х гг. до настоящего времени).** На этом этапе радиофизика, проникая во многие разделы физики, вносит туда (кроме экспериментальной методики) радиофизические представления. В результате взаимного обмена с другими областями физики, с одной стороны, и обособления отдельных разделов – с другой, внутри радиофизики образовалось несколько важных «дочерних» направлений исследований: статистическая радиофизика, квантовая электроника, радиоспектроскопия, радиоастрономия, микроэлектроника и др.

Развитие радиофизики сопровождается открытием новых явлений, находящихся практическое применение и составляющих основу ее новых разделов. При этом некоторые разделы радиофизики выделяются в самостоятельные области физики (радиоастрономия, радиоспектроскопия и др.), где методы радиофизики служат лишь средством изучения явлений, лежащих за пределами радиофизики.

1.3. Нобелевские премии в области радиофизики

Обсудим радиофизические исследования, удостоенные Нобелевской премии по физике. Для этого воспользуемся табл. 1, в которой представлены имена лауреатов, формулировки Нобелевского комитета и год присуждения премии.

Таблица 1

Лауреаты	Формулировка Нобелевского комитета	Год присуждения
Г. Маркони и К. Ф. Браун	«За выдающийся вклад в создание беспроводной телеграфии»	1909
И. А. Раби	«За резонансный метод измерений магнитных свойств атомных ядер»	1944
Э. В. Эплтон	«За исследования физики верхних слоев атмосферы, в особенности за открытие так называемого слоя Эплтона»	1947
Ф. Блох и Э. М. Перселл	«За развитие новых методов для точных ядерных магнитных измерений и связанные с этим открытия»	1952
У. Ю. Лэмб	«За открытия, связанные с тонкой структурой спектра водорода»	1955
П. Куш	«За точное определение магнитного момента электрона»	1955
У. Б. Шокли, Дж. Бардин и У. Х. Браттейн	«За исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта»	1956
Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и Ч. Х. Таунс	«За фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на лазерно-мазерном принципе»	1964
А. Кастлер	«За открытие и разработку оптических методов исследования резонансов Герца в атомах»	1966
Д. Габор	«За изобретение и развитие голографического принципа»	1971
Б. Д. Джозефсон	«За теоретическое предсказание свойств тока, проходящего через туннельный барьер, в частности явлений, общеизвестных ныне под названием эффектов Джозефсона»	1973
Л. Эсаки и А. Джайвер	«За экспериментальные открытия туннельных явлений в полупроводниках и сверхпроводниках»	1973
М. Райл и Э. Хьюиш	«За пионерские исследования в области радиоастрофизики»	1974

Лауреаты	Формулировка Нобелевского комитета	Год присуждения
А. А. Пензиас и Р. В. Вильсон	«За открытие микроволнового реликтового излучения»	1978
Н. Рамзей	«За изобретение метода раздельных колебательных полей и его использование в водородном мазере и других атомных часах»	1989
Х. Демелт и В. Пауль	«За разработку метода удержания одиночных ионов»	1989
Р. Халсе и Дж. Тейлор-мл.	«За открытие нового типа пульсаров, давшее новые возможности в изучении гравитации»	1993
С. Чу, К. Коэн-Таннуджи и У. Филлипс	«За создание методов охлаждения и улавливания атомов лазерным лучом»	1997
Ж. И. Алфёров и Г. Крёмер	«За разработки в полупроводниковой технике»	2000
Дж. Килби	«За исследования в области интегральных схем»	2000
Р. Глаубер	«За вклад в квантовую теорию оптической когерентности»	2005
Дж. Холл и Т. Хэнш	«За вклад в развитие лазерного высокоточного спектроскопирования и техники прецизионного расчета светового сдвига в оптических стандартах частоты»	2005
Дж. Смут и Дж. Мазер	«За открытие планковской формы спектра космического фонового излучения и анизотропии космического фонового излучения»	2006
А. Ферт и П. Грюнберг	«За открытие гигантского магнетосопротивления»	2007
Ч. Као, У. Бойл и Дж. Смит	«За новаторские достижения в области передачи света по оптоволоконным каналам и разработку оптических полупроводниковых сенсоров – ПЗС-матриц»	2009
А. Гейм и К. Новосёлов	«За новаторские эксперименты по исследованию двумерного материала графена»	2010

Первая Нобелевская премия в области радиофизики (**радиотехники**) была присуждена Г. Маркони и К. Ф. Брауну в 1909 г. «за выдающийся вклад в создание беспроводной телеграфии». Одним

из изобретателей радио является русский физик А. С. Попов. В результате исследований Попову удалось сконструировать радиопередатчик и радиоприемник, демонстрация которых проводилась 7 мая 1895 г. Хотя Г. Маркони нельзя считать единоличным изобретателем радио, бесспорны его огромные заслуги в последующем увеличении дальности передачи сигналов, развитии промышленного производства радиоаппаратуры, ее последующем совершенствовании.

К заслугам немецкого ученого К. Ф. Брауна относится изобретенный им в 1897 г. осциллоскоп (осциллограф). Браун занимался также разработкой устройств беспроволочной телеграфии. Его изобретения позволили избавиться от потерь энергии на создание «искры» (что существенно повысило КПД передатчика), а также эффективно использовать явление резонанса.

Исторически следующая Нобелевская премия, связанная с радиофизикой, была присуждена в 1944 г. американскому физiku И. А. Раби «за резонансный метод измерений магнитных свойств атомных ядер». Раби обнаружил, что, прикладывая слабый радиочастотный сигнал к молекулярному пучку в магнитном поле, можно заставить атомы изменять ориентацию спинов. Управляя частотой радиосигнала, Раби получил возможность провести прецизионные измерения спина ядра и напряженности собственного магнитного поля ядра. Эти измерения имели огромное значение для ядерной физики.

Исследования Раби и его учеников заложили фундамент нового направления в радиофизике – **радиоспектроскопии**.

- Ф. Блох и Э. М. Перселл (Нобелевская премия 1952 г.)

Американскими учеными Ф. Блохом и Э. Перселлом независимо друг от друга был открыт ядерный магнитный резонанс (ЯМР) – резонансное поглощение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем магнитном поле, что обусловлено переориентацией магнитных моментов ядер. С помощью ЯМР ученые установили, что на магнитные свойства ядер в молекуле оказывают влияние магнитные поля окружающих электронов; это позволяет получать важную информацию о структуре молекулы.

- У. Лэмб и П. Куш (Нобелевская премия 1955 г.)

Американский ученый У. Лэмб занимался вопросами поглощения и испускания микроволнового излучения атомами. Он приготовил пучок атомов водорода в метастабильном состоянии, и затем подверг его

микроволновому облучению во внешнем магнитном поле. При этом некоторые из атомов поглощали излучение и переходили в короткоживущее состояние. Это означало, что два соответствующих энергетических уровня не тождественны, а разделены разностью энергий, получившей название лэмбовского сдвига. С помощью резонансного метода П. Куш и американский физик Г. Фоли исследовали магнитный момент электрона. Им удалось измерить отношение полных внутреннего и орбитального магнитных моментов атомов в различных энергетических состояниях. Тем самым удалось определить с высокой точностью магнитный момент электрона.

- А. Кастлер (Нобелевская премия 1966 г.)

Французские физики А. Кастлер и Ж. Броссель разработали несколько методов, в которых свет использовался для преодоления некоторых ограничений метода Раби. В одном из них (методе оптической накачки) особым образом поляризованный свет направляется на группу атомов. Если основное состояние имеет два магнитных подуровня, то атомы на одном подуровне поглощают свет и переходят в возбужденное состояние, тогда как атомы на другом подуровне этого не делают. Испуская излучение и возвращаясь в основное состояние, атомы занимают и поглощающие, и непоглощающие уровни. В этом случае говорят, что свет «накачал» атомы в непоглощающее основное состояние. В дальнейшем метод оптической накачки лег в основу создания лазера.

- Н. Рамзей (Нобелевская премия 1989 г.)

Работы американского физика Н. Рамзея связаны, главным образом, с использованием метода молекулярных пучков для прецизионных измерений электрических и магнитных свойств нуклонов, ядер, атомов и молекул. Рамзей открыл электрический квадрупольный момент дейтрона. Кроме того, он разработал высокоточные методы радиоспектроскопии молекулярных пучков, в частности, метод разнесенных резонаторов и метод накопительной колбы, а также построил водородный мазер.

- Х. Демелт и В. Пауль (Нобелевская премия 1989 г.)

В 1973 г. в контейнере со «стенками» из электрического и магнитного полей ученым удалось локализовать один захваченный электрон. В 1980 г. в аналогичном устройстве было осуществлено удержание одиночного атома. Эта техника позволила физикам определять

свойства электронов и атомов с беспрецедентной точностью. Инициаторы проведения этих исследований – Х. Демелт и В. Пауль – были удостоены Нобелевской премии по физике 1989 г.

- У. Филлипс, С. Чу и К. Коэн-Таннуджи (Нобелевская премия 1997 г.)

В 1985 г. американский ученый У. Филлипс начал серию экспериментов по лазерному охлаждению атомов натрия. С помощью разработанного им метода удалось охладить пучок атомов натрия до температуры < 100 мК, при этом средняя скорость охлажденных атомов была близка к нулю. В компании Bell Labs американский ученый С. Чу и его коллеги, используя множество пересекающихся лазерных лучей, осуществили дальнейшее охлаждение образца атомов до температуры < 1 мК. Рекордные значения температур были получены группой под руководством французского ученого К. Коэн-Таннуджи в период 1988–1995 гг. Исследователям удалось охладить атомы гелия до температуры $0,18$ мК, атомы натрия до температуры $0,1$ мК, т. е. эксперименты вышли в область нанотемператур. Полученные результаты значительно продвинули знания о взаимодействии излучения с веществом и позволили глубже понять квантово-механическое поведение газов при сверхнизких температурах.

- Р. Глаубер, Дж. Холл и Т. Хенш (Нобелевская премия 2005 г.)

Р. Глаубер, используя схему когерентных состояний (их называют глауберовскими), смог построить строгую квантовую теорию когерентности электромагнитного излучения. Введенные им понятия послужили теоретической базой исследования излучения лазеров и стали общепринятыми в современной квантовой оптике. Исследования Дж. Холла и Т. Хенша позволили измерить оптические частоты с точностью до 15 знаков. Благодаря этому, теперь возможно создание лазеров для высокоточного спектроскопирования и определение спектра излучения молекул и атомов с беспрецедентной точностью, что может быть использовано, в частности, для развития систем спутникового позиционирования и навигации GPS.

Необходимо упомянуть о Нобелевской премии 1947 г., которой был удостоен английский физик Э. В. Эплтон за исследования в области радиотехники. Эплтону и его сотрудникам удалось с помощью метода радиолокации с частотной модуляцией получить первое экспериментальное подтверждение существования ионосферы, определить ее

высоту. Этот метод стимулировал развитие радиотехники и способствовал изобретению радиолокатора. Впоследствии Эплтон открыл второй непроводящий слой. Большее сопротивление этого слоя, ныне известного как слой Эплтона, позволяет ему отражать коротковолновые радиосигналы. Этим открытием Эплтон установил возможность прямого радиовещания на весь мир.

Еще одним Нобелевским «направлением» в радиофизике являются **информационные технологии (квантовая электроника)**, датой рождения которых принято считать 23 декабря 1947 г. В этот день состоялась официальная презентация транзистора. За несколько дней до этого знаменательного события американские ученые У. Шокли, Дж. Бардин и У. Браттейн из компании Bell Labs впервые создали действующий биполярный транзистор. В 1956 г. они были награждены Нобелевской премией по физике «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта».

Следующую Нобелевскую премию в области информационных технологий можно отнести к сверхпроводниковой электронике, которая зародилась в 1960-е гг., после открытия эффектов Джозефсона.

Теоретические изыскания Джозефсона, а также экспериментальное мастерство Л. Эсаки и А. Джайевера позволили всесторонне и глубоко исследовать туннельные явления в полупроводниках и сверхпроводниках. Их ставшие фундаментальными исследования были отмечены Нобелевской премией 1973 г.

Еще одна Нобелевская премия в области информационных технологий относится к квантовой электронике. Благодаря исследованиям советских ученых Н. Г. Басова и А. М. Прохорова, а также научным работам их американских коллег: Ч. Таунса, Дж. Гордона и Х. Цейгера были созданы первые квантовые генераторы. В 1964 г. «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на лазерно-мазерном принципе» А. М. Прохоров, Н. Г. Басов и Ч. Таунс были удостоены Нобелевской премии.

Среди многочисленных применений лазерного излучения особое место занимает голография – метод получения объемного изображения предметов с помощью наложения (интерференции) световых волн. Метод был предложен в 1948 г. венгерским ученым Д. Габором.

Обычные источники света не обладают достаточной степенью когерентности для использования в голографии. Поэтому решающее значение для ее развития имело изобретение лазера, обладающего высокой степенью когерентности и способного излучать строго одну длину волны. Габор, изучая проблему записи изображения, выдвинул замечательную идею. Если пучок когерентного света разделить на два, осветить одним (предметным) регистрируемый объект, а второй (опорный) направить на фотографическую пластинку, то лучи, отраженные от объекта, будут с ним интерферировать. В этом случае интерференционная картина, образующаяся на пластинке, будет устойчива во времени, т. е. образуется изображение стоячей волны.

Полученная интерференционная картина является кодированным изображением, описывающим объект таким, каким он виден из всех точек фотопластинки. В этом изображении сохранена информация как об амплитуде, так и о фазе отраженных от объекта волн и, следовательно, заложена информация о трехмерном (объемном) объекте. Фотографическая запись картины интерференции предметной волны и опорной волны обладает свойством восстанавливать изображение объекта. Если на такую запись снова направить опорную волну, т. е. облучить светом той же длины волны, появится (восстановится) объемное изображение объекта, которое зрительно трудно отличить от реального – голограмма (термин предложен Габором). Д. Габор был удостоен Нобелевской премии по физике 1971 г. «за изобретение и развитие голографического принципа».

В начале 1950-х гг. появилась идея об изготовлении транзисторов, резисторов и конденсаторов в виде единого полупроводникового блока – интегральной схемы. Возможность создания интегральной схемы независимо друг от друга продемонстрировали два молодых инженера – Дж. Килби и Р. Нойс. 12 сентября 1958 г. Килби продемонстрировал руководству компании «Тексас Инструментс» рабочую интегральную схему, сформированную в кусочке германия, наклеенного на стеклянную пластину.

Наряду с исследованиями Дж. Килби основополагающий вклад в развитие информационных технологий внесли работы Ж. И. Алфёрова и Г. Крёмера. Эти ученые занимались всесторонним изучением гетероструктур.

Немецкий физик Г. Крёмер предложил основной принцип конструирования приборов на основе гетеропереходов, который позволил использовать эффективные методы управления движением носителей заряда и световыми потоками.

Трудности в изготовлении гетероструктур удалось преодолеть в 1957 г., когда Алфёровым с коллегами была предложена структура GaAs – GaAlAs. Благодаря обнаружению в ней эффектов сверхинжекции, оптического накопления и др. удалось создать низкопороговый импульсный лазер, работающий при комнатной температуре, и высокоэффективные светодиоды, а вскоре и ряд других приборов (солнечные элементы, биполярные гетеротранзисторы и др.). Эти приборы нашли широкое практическое применение: от космических станций до бытовой и аудиоаппаратуры.

В начале 1990-х гг. одним из основных направлений работ, проводимых под руководством Алфёрова, стало получение и исследование свойств наноструктур пониженной размерности: квантовых проволок и квантовых точек. В 1993–1994 гг. впервые в мире были созданы гетеролазеры на основе структур с квантовыми точками – «искусственными атомами». Таким образом, исследования Алфёрова заложили основы принципиально новой электроники на основе гетероструктур, известной сегодня как «зонная инженерия».

Нобелевская премия по физике за 2000 г. была поделена на две части с вручением половины Ж. И. Алфёрову и Г. Крёмеру за исследование полупроводниковых гетероструктур, которые нашли применение в высокочастотной и оптической электронике. Вторая половина премии досталась Дж. Килби за вклад в изобретение интегральной схемы.

Прошло всего 7 лет, как снова Нобелевской премии были удостоены ученые, исследования которых относятся к области информационных технологий. Речь идет о работах, посвященных спиновой электронике (спинтроники). Интерес исследователей к спиновой электронике возник в 1988 г., в связи с открытием эффекта гигантского магнетосопротивления (ГМС). Открытие было сделано независимо двумя научными группами во главе с А. Фертом и П. Грюнбергом.

В 2009 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Ч. Као, У. Бойлу и Дж. Смиту за исследования в области информационных технологий. Као стоял у истоков оптоволоконной технологии

передачи данных, а Бойл и Смит изобрели полупроводниковое устройство, позволяющее напрямую, минуя фотопленку, получать цифровые фотографии.

В 2010 г. Нобелевской премии по физике удостоены А. Гейм и К. Новосёлов за передовые опыты с двумерным материалом – графеном. Высокая подвижность зарядов вместе с атомарной толщиной делают графен идеальным материалом для создания миниатюрных и быстрых полевых транзисторов – «кирпичиков» современной микроэлектронной промышленности.

Наконец, еще одним Нобелевским «направлением» в радиофизике можно считать **радиоастрономию**. Английский ученый М. Райл вместе с коллегами работал над повышением разрешающей способности радиотелескопов. Расположив две антенны на расстоянии многих длин волн друг от друга, Райл подключил их к одному приемнику. Используя этот простой радиоинтерферометр, ему удалось определить местоположение нескольких так называемых радиозвезд. В дальнейшем Райл создал несколько радиотелескопов с большей апертурой, благодаря которым он сделал ряд фундаментальных открытий в радиоастрономии.

В 1974 г. М. Райл и другой английский астроном Э. Хьюиш были удостоены Нобелевской премии по физике «за пионерские исследования в области радиоастрофизики». Под руководством Э. Хьюиша аспирантка Кембриджского университета Дж. Белл проводила поиск радиоисточников с быстро и заметно меняющейся амплитудой сигнала. Проводя круглосуточные исследования, Белл обнаружила быстропеременный источник – «помеху» на длине волны 3,5 м (85,7 МГц), которая наблюдалась даже ночью, когда мерцающих источников не должно было быть. По импульсному характеру излучения эти источники были названы пульсарами. Открытие пульсаров в 1967 г. стало крупнейшей вехой в развитии радиоастрономии наряду с открытыми за несколько лет до этого квазарами и реликтовым излучением.

Следующим крупным достижением радиоастрономии принято считать обнаружение двойных пульсаров. Нобелевская премия по физике 1993 г. была присуждена американским астрофизикам Дж. Тэйлору-мл. и Р. Халсе за открытие и исследование первого двойного радиопульсара PSR 1513-16. Открытие было сделано на радиотелескопе Аресибо летом 1974 г. Халсе, который в то время был аспирантом

у Тэйлора. Оказалось, что источник представляет собой быстро вращающуюся сверхплотную нейтронную звезду с сильным магнитным полем, которая входит в состав двойной системы и движется по очень вытянутой орбите с периодом 6,75 ч.

Уникальным достижением радиоастрономии является открытие реликтового излучения. В 1965 г. американские ученые А. Пензиас и Р. Вильсон обнаружили постоянное слабое излучение, исходящее из каждой точки небесной сферы. Существование подобного излучения, заполняющего Вселенную, было предсказано Г. А. Гамовым и его сотрудниками, построившими первую модель Большого взрыва еще в 1948 г. Когда был получен спектр этого излучения (оно представляло собой излучение абсолютно черного тела с температурой около 3 К) и доказана высокая степень его изотропии, данная модель стала общепринятой.

В 1978 г. А. Пензиас и Р. Вильсон были удостоены Нобелевской премии по физике «за открытие микроволнового реликтового излучения». В дальнейшем проводились многочисленные исследования реликтового излучения, которые привели в конечном счете к открытию его анизотропии.

Благодаря исследованиям американского ученого Дж. Мазера, который координировал работы по программе “COBE” и руководил экспериментом “FIRAS”, удалось выявить соответствие микроволнового фона излучению абсолютно черного тела. Другой американский ученый Дж. Смут был ответственен за разработку другого ключевого устройства “COBE” – “DMR”. Это устройство использовалось для обнаружения небольших флуктуаций реликтового излучения по разным направлениям.

В 2006 г. Дж. Мазеру и Дж. Смуту была присуждена Нобелевская премия по физике за «открытие планковской формы спектра космического фонового излучения и анизотропии космического фонового излучения».

Проведенный анализ не может считаться абсолютно точным, так как многие современные открытия совершаются на стыке различных наук. Тем не менее можно выделить несколько ведущих направлений радиофизических исследований. К их числу относятся: радиотехника, радиоспектроскопия, информационные технологии, радиоастрономия (показаны на схеме). В дальнейшем эти направления радиофизики

мы будем называть *магистральными*. Из схемы видно, что пальма первенства среди наиболее премированных направлений радиофизических исследований принадлежит радиоспектроскопии (8 Нобелевских премий, 18 лауреатов).



Отметим, что история радиофизики не только охватывает по своей тематике указанные 4 направления радиофизики, но и учитывает междисциплинарные связи радиофизики и других областей знания, например, радиофизика и медицина, радиофизика и оборона страны и др.

Модуль № 2. Исторический обзор развития радиотехники и вакуумной электроники

2.1. Беспроволочная телеграфия

Открытие Генрихом Герцем (1857–1894) электромагнитных волн, изучение их свойств и создание оригинальных приборов – вибратора и резонатора (первого генератора высокочастотного электромагнитного поля и его индикатора) – составляют важный этап предистории радиофизики. Однако эти достижения еще нельзя отнести к изобретению радио.



Г. Герц

Из-за невысокой чувствительности приемника Герца и неудобного способа наблюдения принимаемых сигналов осуществление приема было возможно только на расстоянии 8–10 м от передатчика.

Большой шаг вперед в этом деле сделал итальянский физик Аугусто Риги (1850–1920). Он сконструировал вибратор, состоящий из близко расположенных металлических шаров, помещенных в масляную ванну (рис. 1).

Длина волны определялась размерами шаров и диэлектрической проницаемостью масла. С помощью созданного устройства Риги удалось возбудить волны длиной несколько сантиметров (чаще всего он работал с волнами длиной 10,6 см).

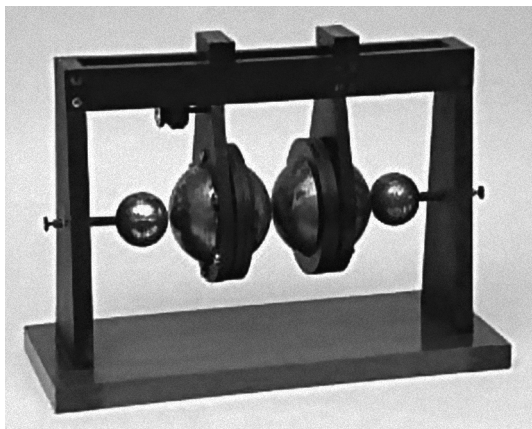
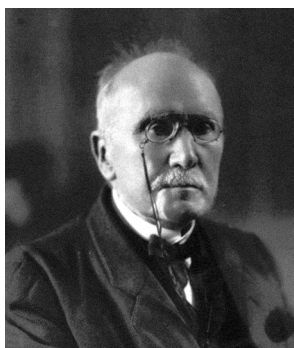


Рис. 1. Сферический осциллятор сантиметровых волн Риги

Важнейшее после Герца научное достижение, которое в какой-то степени можно рассматривать как прототип первого радиоприемника, – экспериментальные работы Эдуарда Бранли (1844–1940) по изучению влияния электромагнитного поля на проводимость металлических порошков.

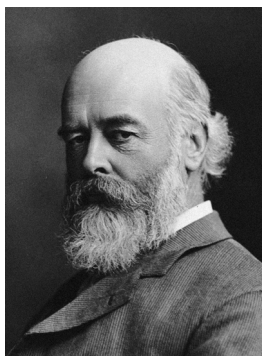


Э. Бранли

Изобретение когерера – прибора, сопротивление которого резко изменяется под действием электромагнитного излучения, – принадлежит Бранли. В 1890 г. он обнаружил, что вблизи происходящих электрических разрядов резко уменьшается сопротивление нанесенного на стеклянную или эбонитовую пластины отполированного слоя тонко измельченной меди. Контакт порошка с внешней цепью осуществлял-

ся с помощью медных пластинок, прижимаемых струбцинками. Бранли назвал свой прибор радиокондуктором. Однако в приборе Бранли необходимо было каждый раз встряхивать опилки перед каждым приемом излучения.

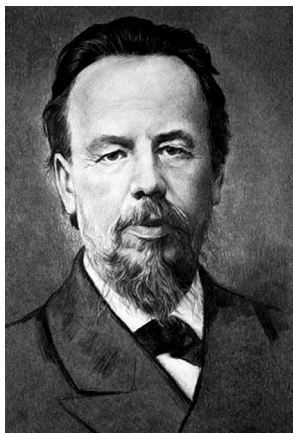
Более совершенный когерер, сконструированный английским физиком Оливером Джозефом Лоджем (1851–1940), представлял собой стеклянную трубку, набитую металлическими опилками («трубку Бранли»), которые для восстановления чувствительности к электромагнитным волнам следовало периодически встряхивать. Для этой цели использовался механизм, похожий на электрический звонок. О своем изобретении Лодж сообщил в докладе на заседании Британской ассоциации содействия развитию науки в Оксфордском университете в 1894 г. Когерер Лоджа под действием электромагнитных волн «открывался», замыкая цепь постоянного тока, на расстоянии около 40 м.



О. Лодж

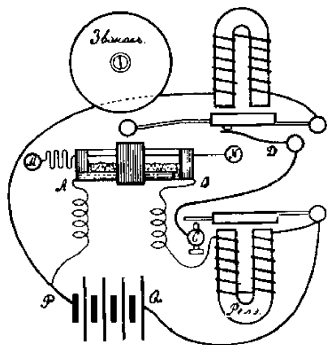
Прибор Лоджа мог быть использован для беспроводной телеграфии, но его создание еще нельзя назвать изобретением радио: когерер не обеспечивал достаточной надежности, а встряхивание опилок не было автоматическим после каждого сигнала.

Обе эти задачи решил русский ученый Александр Степанович Попов (1859–1906). В результате многочисленных экспериментов он усовершенствовал когерер, снабдил его устройством автоматического встряхивания, а также, что не менее важно, добавил контур релейного усиления сигнала и проволочную антенну. Все это в совокупности и сделало прибор пригодным для беспроводной телеграфии.

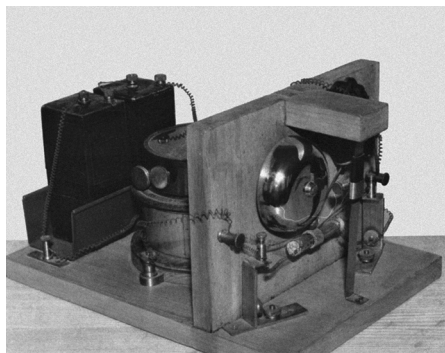


А. С. Попов

7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества Попов выступил с докладом «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям» и демонстрацией созданного им первого в мире радиоприемника. Свое сообщение Попов закончил следующими словами: «В заключение могу выразить надежду, что мой прибор при дальнейшем усовершенствовании его может быть применен к передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающих достаточной энергией». Этот день вошел в историю мировой науки и техники как день рождения радио.



а



б

Рис. 2. а – схема; б – внешний вид радиоприемника Попова

Через 10 месяцев 24 марта 1896 г. Попов на заседании русского физико-химического общества передал первую в мире радиограмму на расстояние в 250 м. Летом следующего года дальность беспроводной связи была увеличена до 5 км.

В 1896 г. Попов применил аналогичное приемное устройство с записывающей аппаратурой для регистрации грозовых разрядов. В процессе изготовления и испытания приемника он обнаружил его чувствительность к атмосферным разрядам, что сказывалось на надежности радиосвязи. Заинтересовавшись этим явлением, Попов провел серию экспериментов, результаты которых послужили основанием для создания другого приемника. Для обеспечения круглосуточной надежной регистрации атмосферных электрических разрядов без участия оператора детектор приемника подключался к громоотводу и заземлению. Параллельно к звонку подключался самопишущий прибор (пишущая катушка братьев Ришар) с недельным заводом. Прибор записывал на движущуюся бумажную ленту сигналы, вызванные электромагнитным излучением гроз. Профессор Д. А. Лачинов назвал этот прибор «грозоотметчиком» («разрядотметчиком»). В историю он вошел как прибор, открывший возможность использования природных электромагнитных волн в интересах человека. Грозоотметчик нашел применение в метеорологии (использовался для предсказания погоды), но особенно он был востребован на Военно-морском флоте.

Попову принадлежит еще одно открытие, значение которого трудно переоценить. Во время опытов по радиосвязи на военных кораблях Балтийского флота летом 1897 г. было установлено, что электромагнитные волны отражаются от кораблей. Попов сделал вывод о возможности практического использования этого явления и задолго до возникновения радиолокации и радионавигации сформулировал важнейшие идеи для создания и развития этих направлений техники.

В ноябре 1897 г. французский предприниматель и инженер, владелец мастерской физических приборов в Париже Э. Дюкрете, используя описание и схему устройства Попова, изготовил когерентный приемник и передатчик, основанный на вибраторе Герца. Дюкрете продемонстрировал работу этих устройств во время докладов на заседаниях Французского физического общества. В конце 1898 г. фирма Дюкрете приступила к мелкосерийному производству радиостанций системы Попова, выполняя заказы военно-морских ведомств России

и Франции. Для России фирма изготовила в общей сложности около 50 корабельных радиостанций.

Особенно успешное развитие беспроводной телеграфии началось в 1899 г., когда сотрудникам Попова П. Н. Рыбкину и Д. С. Троицкому удалось при проведении работ между двумя кронштадтскими фортами случайно обнаружить, что когерер при уровне сигнала, не достаточном для его возбуждения, преобразует амплитудно-модулированный высокочастотный сигнал в низкочастотный, так что его сигналы становится возможным принимать на слух.

Прием радиосигналов на слух открыл новые возможности в создании радиолиний. Регистрация сигналов за счет этого эффекта (детектирования) повышала чувствительность приемного устройства, а следовательно, дальность радиосвязи. В 1900 г. Попов осуществил связь в Балтийском море на расстоянии свыше 45 км между островами Гогланд и Кутсаало, недалеко от города Котка. Эта первая в мире практическая линия беспроводной связи обслуживала спасательную экспедицию по снятию с мели броненосца «Генерал-адмирал Апраксин», севшего на камни у южного берега Гогланда. Первая радиограмма, переданная Поповым на остров Гогланд 6 февраля 1900 г., содержала приказ ледоколу «Ермак» выйти на помощь рыбакам, унесенным на льдине в море. Ледокол выполнил приказ, и 27 рыбаков были спасены. Успешное применение этой линии послужило стимулом к «введению беспроводного телеграфа на боевых судах как основного средства связи», – так гласил соответствующий приказ по Морскому министерству. Работы по внедрению радиосвязи в русском Военно-морском флоте производились при участии самого изобретателя радио и его ассистента Рыбкина.

С появлением «телефонного приемника» на основе открытия Рыбкина и Троицкого существенно возросла дальность действия линий радиосвязи. В конце 1899 г. фактически закончилась эра «когерерного» приема радиосигналов. В дальнейшем многочисленные модификации когерера использовались уже в качестве детектирующих устройств; были созданы различные типы контактных, а позднее и электровакуумных детекторов.

Таким образом, Попов научно обобщил и развил сделанные до него отдельные разрозненные открытия в науке и технике, нашел способы передачи сообщений на расстояние с помощью электромагнитных

Ильин Вадим Алексеевич
Кудрявцев Василий Владимирович

ИСТОРИЯ РАДИОФИЗИКИ
Модульный курс для магистров

Учебное пособие

Редактор Дубовец В. В.
Оформление обложки Удовенко В. Г.
Компьютерная верстка Дорожкина О. Н., Ковтун М. А.

Управление издательской деятельности
и инновационного проектирования МПГУ
119571, Москва, Вернадского пр-т, д. 88, оф. 446.
Тел.: (499) 730-38-61
E-mail: izdat@mpgu.edu

Подписано в печать 20.03.2017. Формат 60х90/16.
Бум. офсетная. Печать цифровая. Объем 20,0 п. л.
Тираж 500 экз. Заказ № 654.

ISBN 978-5-4263-0482-6



9 785426 304826