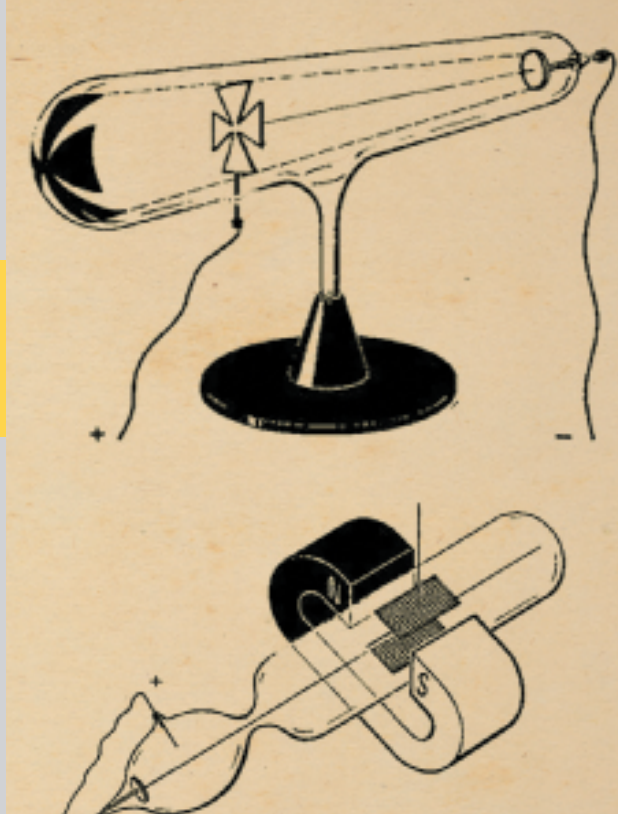




АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,

д. т. н., проф. каф.
систем автоматического управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
a.mikerov@gmail.com

К концу XIX в. электричество уже нашло широкое применение как в промышленности (электродвигатели, генераторы, электротехнологии), так и в быту (телеграф, телефон, освещение). Вершиной науки об электричестве и магнетизме была электромагнитная теория, или электродинамика, Максвелла, созданная в 1864 г. и объясняющая все известные в этой области эффекты. Однако в ней не было места электрону.



НАЧАЛО ЭЛЕКТРОНИКИ — ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА

ПРЕДЫСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОНА

Электродинамика Максвелла не давала ответа на вопрос, который мучил всех физиков: а что же такое электрический ток? К тому времени уже было установлено, что все вещества состоят из молекул и мельчайших частиц — атомов, но какое отношение они имеют к электрическому току, было неизвестно. Существовали две основные точки зрения [1–4]:

- Электрический ток — это поток материальных частиц с дискретным зарядом (или электрическая жидкость, как предполагал Бенджамин Франклин), текущий по проводнику. Такой точки зрения придерживались Густав Фехнер (Gustav Fechner) и Вильгельм Вебер (Wilhelm Weber). Последний говорил: «С каждым весомым атомом связан электрический атом».
- Электрический ток — это электромагнитный поток энергии, который создается зарядами, не связанными с материальными частицами. Так считали Герман

Гельмгольц (Hermann Helmholtz), Генрих Герц (Heinrich Hertz), Вильгельм Рентген (Wilhelm Röntgen).

Максвелл обошел этот вопрос, введя параметры диэлектрической постоянной, проводимости и магнитной проницаемости среды без объяснений, почему разные материалы имеют разные характеристики. Косвенным ответом могли служить известные к тому времени физические явления — электролиз, электрический разряд в газах, катодные лучи [1].

Действительно, первый закон электролиза Фарадея прямо указывал на однозначную связь количества вещества, перенесенного в гальванической ванне, с величиной протекающего заряда. Электрический тлеющий разряд в газах также первым изучил великий Фарадей.

Немецкий физик Генрих Гейслер (Heinrich Geißler) с помощью изобретенного им ртутного вакуумного насоса добился высокого вакуума и создал газоразрядные трубки с ярким свечением (трубки

Гейслера) [2]. Очевидно, что свечение молекул газа может вызываться только их бомбардировкой какими-то частицами, которые движутся между катодом и анодом и были названы катодными лучами, а открыл их в 1859 г. немецкий профессор физики университета Бонна Юлиус Плюккер (Julius Plücker) при проведении опытов с трубкой Гейслера [2, 4, 5]. Это устройство, улучшенное в 1875 г. британским ученым Уильямом Круксом (William Crookes), работавшим в собственной лаборатории, показано на рис. 1, где: 1 — вакуумная трубка, 2 — катод, 3 — анод, 4 — фосфоресцирующий экран. При высоком напряжении, порядка 10 тыс. В, в центре экрана возникало светящееся пятно. Было выяснено, что катод испускал какие-то лучи, распространявшиеся прямолинейно и отклонявшиеся мощным электромагнитным полем. Однако, как показал Герц, электрическое поле на эти лучи не влияет. Крукс предположил, что открытые лучи — это поток отрицательно заряженных частиц. Но такая идея была поначалу

опровергнута Герцем, показавшим, что катодные лучи легко проникают через экран из золотой фольги внутри трубки.

Немецкий физик Вильгельм Рентген (Wilhelm Röntgen, рис. 2), экспериментируя с мощными трубками Крукса, открыл в 1895 г. знаменитые X-лучи, называемые в России рентгеновскими [1, 4].

Как это часто бывает, все произошло случайно. Задержавшись после работы в лаборатории, Рентген обнаружил, что фотопластинки, запечатанные в плотную черную бумагу, темнели вблизи трубки Крукса. Решив с этим разобраться, он продолжил исследования и через шесть недель опубликовал снимки, которые потрясли весь мир. Установка Рентгена с трубкой Крукса на штативе показана на рис. 3.

На первой рентгенограмме была рука человека с кольцом (рис. 4), по которому друзья легко угадали жену ученого. Потом, когда выяснилось, что рентгеновские лучи смертельно опасны, недоброжелатели говорили, что Рентген это знал и потому подставил свою жену.

На другом снимке Рентгена был виден кошелек с монетами внутри. Рентгеновские лучи довольно быстро нашли применение, и уже во время Первой мировой войны полевые лазареты оснащались мобильными рентгеновскими установками, спасшими жизнь тысячам раненых солдат. Вполне заслуженно профессор Рентген стал первым Нобелевским лауреатом по физике в 1901 г.

Все перечисленные факты наводили ученых на мысль о том, что электрический ток, возможно, является потоком неких мельчайших отрицательно заряженных частиц. В 1874 г. ирландский физик Джордж Стоуни (George Stoney) предположил, что электричество имеет дискретную структуру. Позднее, в 1891 г., он назвал эту элементарную частицу, или «атом электричества», электроном от греческого слова ἤλεκτρον, означающего янтарь. Благодаря законам электролиза ему удалось оценить величину ее отрицательного заряда, которая составляет порядка 10^{-19} Кл [2]. Стоуни также предложил первую систему физических единиц, основанную на этом элементарном заряде, скорости света и гравитационной постоянной Ньютона.

Первым эту гипотезу использовал знаменитый голландский физик

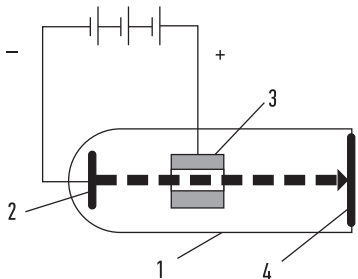


РИС. 1. ◀
Трубка Крукса

РИС. 2. ▶
Вильгельм Рентген
(1845–1923)

РИС. 3. ▼
Установка Рентгена

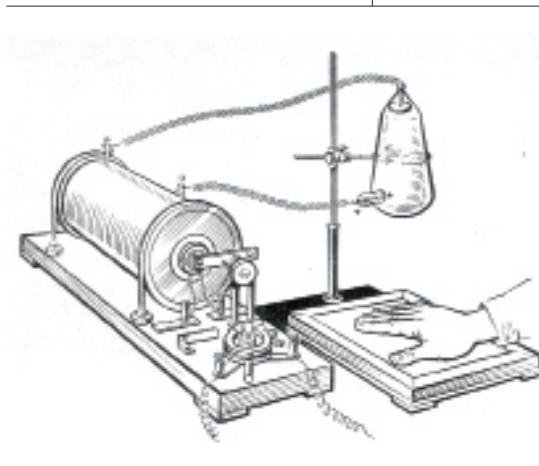


РИС. 4. ▶
Первая рентгенограмма



Хендрик Лоренц (Hendrik Lorentz) (рис. 5) в 1875 г. в своей докторской диссертации [7]. Он же определил величину и направление силы, действующей на заряженную частицу в магнитном поле (сила Лоренца).

Работа Лоренца была впоследствии названа первой электронной теорией, и он был удостоен Нобелевской премии по физике 1902 г. Позднее Лоренц вместе с немецким физиком Паулем Друде (Paul Drude) построил электронную теорию электропроводности металлов, объясняющую, в частности, законы Ома и Джоуля — Ленца.

Однако все эти теоретические рассуждения нуждались в серьезной экспериментальной проверке, тем более что не все физики смирились к этому времени даже с атомом, а им предлагалась какая-то еще более мелкая частица.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ТОМСОНА И МИЛЛИКЕНА

В 1897 г. директор хорошо оборудованной кавендишской лаборатории Кембриджского университета Джозеф Джон Томсон (Joseph John Thomson, рис. 6) попытался измерить заряд и массу электрона, который он называл «корпускулой» (corpuscle) [3–5].

Установка Томсона показана на рис. 7, где: A, B — аноды, C —

РИС. 5. ▶
Хендрик Лоренц
(1853–1928)



катод, D, E — отклоняющие пластины, F — электромагнит, Ф — магнитный поток, f — электромагнитная сила, приложенная к движущейся частице. Прежде всего Томсон добился отклонения катодных лучей в электрическом поле. Он объяснил неудачу опыта Герца, упомянутого

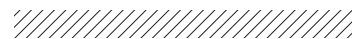


РИС. 6. ►
Джозеф Джон Томсон
(1856–1940)



РИС. 7. ►
Эксперимент Томсона

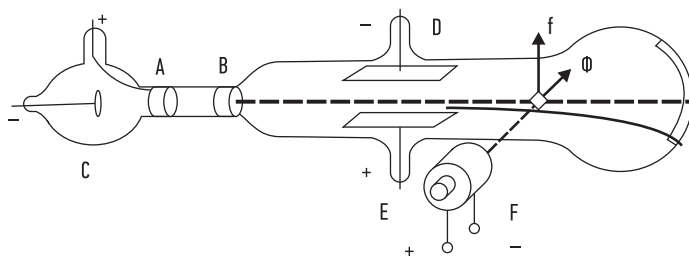


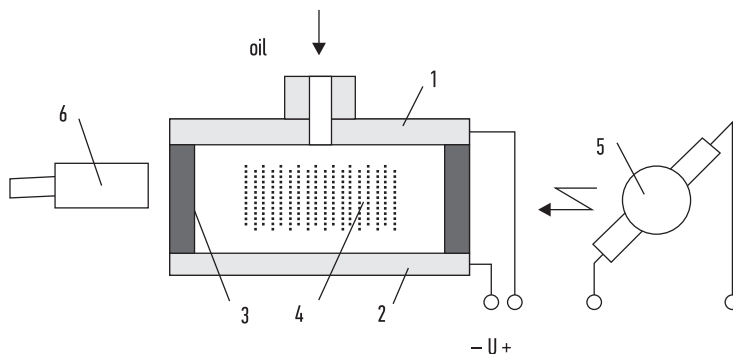
РИС. 8. ►
Роберт Милликен
(1868–1953)



выше, недостаточно высоким вакуумом, вследствие чего остаточный газ ионизировался катодными лучами, образуя экран вокруг потока частиц, препятствующий внешнему электрическому полю.

Откачивая газ в течение нескольких дней, Томсон добился чрезвычайно высокого вакуума внутри трубки и наблюдал явные отклонения катодного луча — например вниз, как показано на рис. 7. Это отклонение могло быть скомпенсировано магнитным полем, отклоняющим катодный луч, подобно электрическому току, вверх, согласно правилу левой руки (правилу Флеминга).

РИС. 9. ►
Эксперимент Милликена



Далее, при проведении многократных опытов, меняя комбинацию потенциала анодов, напряжения на отклоняющих пластинах и тока электромагнита, Томсон безуспешно пытался разделить заряд электрона e и его массу m . Однако надежные результаты были получены только для их отношения e/m , а также скорости электрона, которая оказалась равной $1/3$ скорости света, что было хорошим аргументом против электромагнитной природы катодных лучей. Позднее выяснилось, что величина e/m не зависит от материала катода, а также газа в трубке и вообще от вида электронной эмиссии. Резюмируя свойства электрона, Томсон писал: «...Следовательно, кажется естественным рассматривать его в качестве одного из кирпичиков, из которых построен атом» [5].

Таким образом, рухнуло представление о том, что атом является фундаментальной и неделимой частицей. Эксперименты Томсона по управлению потоком электронов были настолько убедительными, что 1897 год считается годом открытия электрона. Томсон был удостоен Нобелевской премии в 1906 г., получил много других престижных наград и даже был посвящен в рыцари. Семь его студентов и его сын также стали нобелевскими лауреатами.

Однако для убедительного измерения самого заряда электрона нужна была совершенно другая идея. И ее предложил в 1910 г. профессор Чикагского университета (США) Роберт Милликен (Robert Millikan, рис. 8), ассистент профессора Альберта Майкельсона (Albert Michelson), измерившего скорость света [2–4].

Начав заниматься научными исследованиями только в 40 лет, он стал нобелевским лауреатом в 1923 г. за измерение заряда электрона и экспериментальное подтверждение теории фотоэлектрического эффекта Эйнштейна. Установка Милликена показана на рис. 9.

Она представляла собой камеру диаметром 22 см, содержащую верхний (1), нижний (2) электроды и стеклянную стенку (3). После впрыскивания масла (oil) внутри камеры образовывалось облако капелек (4), облучение которых рентгеновской трубкой (5) заряжало их отрицательно. Движение отдельной капельки можно было наблюдать через микроскоп (6). Скорость опускания каждой капельки

при отсутствии напряжения U позволяла определить ее массу, а скорость подъема при приложении высокого напряжения — ее заряд. Заряд каждой капли $q = N \times e$, где N — число электронов в капле. Естественно, число электронов N в каждой капле является неизвестным, но можно рассчитать наименьшее общее кратное заряда разных капель — e , которое и будет равно заряду одного электрона. Для статистической достоверности эксперимента Милликену пришлось терпеливо выполнить более тысячи опытов за пять лет. В итоге заряд электрона оказался равным $1,6 \times 10^{-19}$ Кл, что по порядку величины совпадало с оценкой Стоуни. После этого из известного отношения Томсона e/m была найдена и масса электрона $9,1 \times 10^{-28}$ г, которая оказалась в 1800 раз меньше массы атома водорода.

Результаты Милликена были подтверждены опытами ученика Рентгена, российского физика Абрама Федоровича Иоффе, проведенными в Санкт-Петербургском политехническом институте в 1913 г. [3]. Иоффе использовал аналогичную камеру, но вместо масляных капель впрыскивал мельчайшие частицы цинка,

а рентгеновский аппарат заменил ультрафиолетовым источником, выбивающим из цинка электроны за счет фотоэффекта. Иоффе был основателем советской школы полупроводниковой и ядерной физики. Однако в 1942 г. он уклонился от руководства проектом советской атомной бомбы и рекомендовал на этот пост своего ближайшего ученика Игоря Васильевича Курчатова [8]. Он не стал нобелевским лауреатом, но двое его студентов — Николай Николаевич Семенов и Петр Леонидович Курчатов — были удостоены этой награды.

Таким образом, существование новой частицы, электрона, было твердо установлено. С этим согласился даже Рентген, долго ее не признававший. Это открытие проложило дорогу к созданию первых вакуумных электронных приборов в начале XX в. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Минеров А. Г., Вейнмейстер А. В. История науки и техники в области управления и технических систем. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016.
2. Спасский Б. И. История физики. Ч. 2. М.: Высшая школа. 1977.
3. Кудрявцев П. С. Курс истории физики. М.: Просвещение. 1974.

Открытие электрона, ставшее вершиной науки об электричестве и магнетизме в XIX столетии, включало:

- исследования Фарадея в области электролиза и электрического разряда в газах;
- открытие катодных лучей Плюккером;
- демонстрацию Рентгеном X-лучей;
- опыты Томсона по определению скорости потока электронов и отношения заряда электрона к его массе;
- заключительные эксперименты Милликена и Иоффе по измерению заряда электрона.

4. Липсон Г. Великие эксперименты в физике. М.: Мир. 1972.
5. Thomson J. J. Discovery of the Electron. Nobel Lecture 1906 // Nobel Lectures. Physics. 1901–1921. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. 1967.
6. Уилсон М. Американские ученые и изобретатели. М.: Знание. 1964.
7. Lorentz H. A., Zeeman P. The Theory of Electrons and the Propagation of Light. Nobel Lecture 1902 // Nobel Lectures. Physics. 1901–1921. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. 1967.
8. Новоселов В. Н., Толстиков В. С. Атомный проект. Тайна «сороковки». Екатеринбург. 1995.