

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

539.124(09)

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ГАЗОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ *)

С. Браун

У физики было не так много пророков, но сэр Уильям Крукс заслуживает того, чтобы считаться одним из них. Всю свою жизнь он проработал с «вакуумными» трубками, фокусируя таинственные лучи на светящиеся под их ударами минералы, раскручивая слюдяные «гребные колесики» этими лучами, пытаясь определить их характеристики задолго до того, как были открыты, в нынешнем смысле слова, электроны или ионы, задолго до того, как стали думать о том, чтобы хотя бы применить к его опытам представления о подвижности, диффузии, прилипанию или рекомбинации. Он говорил аудитории на собрании Британской ассоциации за развитие науки в 1879 г.

«Эти явления настолько непохожи на происходящее в воздухе или газе при обычном давлении, что мы вынуждены предположить, что здесь мы оказались лицом к лицу с веществом в Четвертом Состоянии, в состоянии столь же далеком от газового состояния, как газ от жидкости.

Изучая это Четвертое Состояние вещества, мы, кажется, наконец, ухватили и подчинили своему контролю маленькие неделимые частички, которые, как можно предположить с большой уверенностью, составляют физическую основу Вселенной ... Мы действительно соприкоснулись с гранью, где Вещество и Сила как бы проникают друг в друга, с призрачным царством между Известным и Неизвестным, к которому меня всегда особенно тянуло. Я осмелюсь думать, что величайшие научные проблемы будущего найдут свое решение в этой Пограничной Стране, и даже за ней; там, кажется мне, лежит Высшая Истина, нежная, глубокая, удивительная» (Крукс, 1879а.)

Когда Крукс говорил о четвертом состоянии вещества, это никоим образом не было проявлением его невежества, хотя как раз к этому времени он только что перестал бродить в научных потемках, куда его увлекли занятия спиритуализмом и связью с загробным миром, которым он с энтузиазмом отдавался всей своей душой. Он составил себе репутацию в основном как химик, открывший элемент таллий, и как издатель «Chemical News». Будучи членом Королевского общества, он вступал в резкие стычки с собратьями по обществу, когда они отказывались принимать его статьи о «таинственных силах и призраках» в 1870—1874 гг. Энергичный предприниматель, он зарабатывал на жизнь в качестве директора «Native Guano Company», перерабатывавшей лондонские сточные воды на удобрение

*) Brown Sanborn C. A Short History of Gaseous Electronics. — In: Gaseous Electronics. V. 1; Electrical Discharges/Ed. M. N. Hirsch, H. J. Oskam. — New York; San Francisco; London: Academic Press, 1978. — Pp. 1—18. — Перевод А. А. Веденцова.

© Academic Press 1978.

© Перевод на русский язык, Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук» 1981.

ния для продажи, и в это же время изобрел свой знаменитый радиометр (и дал ему название), вызвавший огромную сенсацию среди ученых и широкой публики.

Экспериментируя в 1878 г. со своим «электрическим радиометром», Крукс заметил, что если лопасти были заряжены отрицательно, то каждую лопасть окружало, и крутилось вместе с ней темное пространство; и он начал (взяв в помощники самого искусного стеклодува, Чарльза Гимингема) длинную серию опытов с тлеющим разрядом и сконструировал много «круковских трубок».

Важным техническим достижением, обусловившим прогресс в середине XIX века, было открытие в 1851 г. Генрихом Даниелем Румкорфом индукционной катушки. До тех пор нужное напряжение получали от лейденских банок либо от батарей. Между прочим, лейденская банка была открыта не в Лейдене, а в Померании Эвальдом Георгом фон Клейстом в 1745 г. Ее назвали лейденской потому, что профессора Питера ван Мушенброка из Лейдена чуть не убило, когда он с ней экспериментировал. Он заканчивает свою публикацию заявлением, что не хотел бы снова испытать такой удар, даже если бы ему предложили все французское королевство. За такое «недостойное отношение» его сурово осудил Джозеф Пристли, который в своей «Истории электричества» сравнивает «трусловитого профессора» и «истинно философский героизм» некоего Георга Вильгельма Рихмана *), шведского физика, который был одной из первых несчастных жертв при попытках воспроизвести эксперимент Франклина со змеем.

По части жертв катушку Румкорфа тоже считали очень опасным элементом лабораторного оборудования, и в лабораторных руководствах не были необычными предупреждения, подобные нижеследующему: «Физиологические эффекты, полученные с помощью катушки Румкорфа, весьма удивительны. Разряд от достаточно большой катушки может убить небольшое животное. Поэтому нужно быть очень осторожным, чтобы не коснуться выводов работающей катушки, особенно нужно быть осторожным, чтобы не коснуться обоих выводов одновременно» (Данмен, 1891, с. 158).

До времен Румкорфа основным электрическим разрядом, который изучался, была низковольтная дуга, поскольку ее можно было поддерживать с помощью батареи. Хотя она была открыта Хэмфри Дэви (использовавшим вольты столб, который Дэви и граф Румфорд сконструировали в Королевском институте в Лондоне) еще в 1808 г., из этих исследований было получено мало сведений фундаментального характера, и дугу рассматривали скорее как новизну, а не как путь к познанию. Этот тип разряда получил наименование «дуги» от Дэви (1821). Создавать искры при атмосферном давлении и вести эксперименты по пробоем при низких давлениях можно было с помощью электростатических машин, но достижимые токи были настолько малы, что стационарные опыты были очень трудны, а измерение параметров переходных явлений было почти недоступно техническим средствам того времени. Изучение чудовищных электрических разрядов молнии (после открытия Франклина 1752 г.), к несчастью, для большинства числа физиков оказывалось фатальным, а не раскрывающим истину.

Второе важное техническое достижение, способствовавшее продвижению эксперимента, принадлежало следующему стеклодуву по имени Генрих Гейслер, основавшему в Бессе мастерскую научных приборов. В 1858 г. Гейслер научился впаивать платиновые электроды прямо в стек-

*) «... Русский физик ... с 1741 проф. АН (академик). С 1744 заведующий физическим кабинетом АН. Осн. работы по калориметрии и электричеству». — БСЭ, 3-е изд., т. 22, с. 410. — (Прим. перев.)

ло, и «гейслеровы» грубки стали обязательной частью демонстрационных лекций по физике конца XIX века. Позднее Гейслер стал профессором физики в Боннском университете, а самый его знаменитый ученик Йоганн Вильгельм Гитторф продолжил его дело в следующем поколении.

Катодные лучи были открыты Юлиусом Плюккером и названы им «Katodenstrahlen». Он показал, что эти лучи заставляют флуоресцировать стекло, слюду и другие вещества, и исследовал влияние магнитного поля на катодные лучи. Плюккер (1859) постулировал, что флуоресценция вызвана электрическими токами, которые идут от катода на стенки трубки и затем возвращаются. Гитторф (1869) обнаружил, что с этими лучами можно получить тень, а дальнейшая работа по этим теням проводилась Эйгеном Гольдштейном (1876), показавшим, что маленькое тело, расположенное поблизости от большого катода, дает тень. Это было важное наблюдение; оно означало, что лучи идут от катода в определенном направлении, и он выдвинул теорию о том, что они суть волны в эфире. Уильям Крукс (1879), с другой стороны, отстаивал теорию, по которой эти лучи были заряженными частицами, вылетающими из катода с большой скоростью под прямым углом к нему. Он показал, что когда эти лучи попадают на лопасти, смонтированные как в радиометре, лопасти приходят в движение. Крукс и Гитторф вступили в горячий спор о том, есть ли этот эффект чисто механическая передача импульса, как утверждал Крукс, или он обусловлен вторичными тепловыми эффектами, как считал Гитторф. Оба они, Крукс и Гитторф, закладывали основания одного из наиболее ярких открытий в физике, и однако двух более разных людей трудно представить.

Крукс, сын благополучного английского бизнесмена, формально мало учился, никогда не окончил университета и переходил с работы на работу в химическую промышленность. В молодости он стал энергичным поборником электричества и это привело его к открытию катодных лучей. Крукс был фотографом, фотографией он увлекался с детства, он был членом Photographical Society of London. Он сфотографировал много интересных вещей, и в свое время он изобрел «Стереокамеру». В работе он не только сотрудничал с фотографами, но и сам увлекался фотографией, рассуждая о ней так и в 1870-е годы с успехом. Но катодные лучи, которые он увидел в трубе, так сильно заинтересовали его, что он решил заняться исследованием этих лучей. Он изобрел прибор, с помощью которого он мог наблюдать тень (рис. 1) на, помещенную близ катода, в вакуумной трубке. Только благодаря ему, обратившись к химическому делу, он стал гораздо более практичным. У него был медленный, веселый и галицистический характер, и в течение одной недели он мог перейти с психическими силами к атомному весу галлия, а затем — к его водству

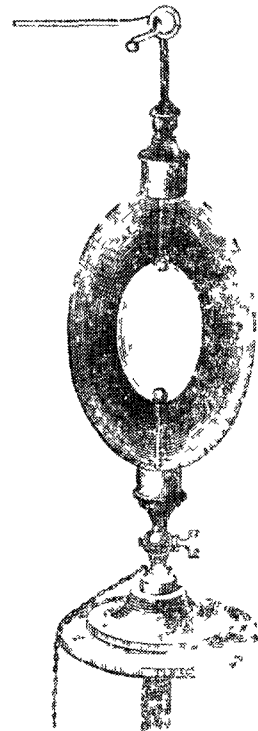


Рис. 1. «Электрическое явление»

Вид на трубку с катодными лучами, изобретенную Гитторфом. В центре трубки находится катод, а в центре — анод. Лучи вылетают из катода и падают на анод, вызывая флуоресценцию. Тень катодных лучей видна на внутренней поверхности трубки.

удобрения из тухлой рыбы. Когда он стал состоятельным, он мог нанять прекрасного стеклодува для своей частной лаборатории. Это, плюс его собственное мастерство в получении хорошего вакуума, в значительной мере определило его успех со всеми типами «кружковых трубок».

Гитторф, с другой стороны, был почти карикатурой на педантичного немецкого профессора физики. Он прошел полный курс обучения в немецком университете, а затем осел в университете маленького городка, с тяжелой педагогической нагрузкой; выкраивая время для опытов, он переутомлялся и экономил, чтобы провести свои исследования. Почти всегда полуголодный, Гитторф трудолюбиво строил свои установки, с которыми у него все время были неприятности. Вот история, возможно, недостоверная, но так или иначе типичная для его невезения. Чтобы понять всю ее значимость, нужно помнить, что он откачивал свои трубки тёмлеровским насосом. Это — длинная и медленная процедура. В 1874 г. Маклеод предложил свой знаменитый манометр, а вскоре после этого Тёмлер изобрел насос, который работал как манометр Маклеода, но к верхнему измерительному отростку была присоединена трубка, которую и нужно было откачивать, так что терпеливо и многократно поднимая и опуская ртутный столб, можно было понизить давление в трубке.

Гитторф пытался определить, есть ли у положительного столба предельная длина. Неделя за неделей росла его разрядная трубка, по мере того как он добавлял метр за метром, отпаивал, откачивал и поднимал все выше и выше напряжение на своей индукционной катушке Румкорфа. Его трубка протягивалась сквозь всю комнату, поворачивалась и шла назад, поворачивалась снова, пока вся его лаборатория не оказалась заполненной тонкими стеклянными трубками. Было лето, и он весь взмок со своим тёмлеровским насосом, он открыл окно, чтобы было сколько-нибудь терпимо. Вдруг со двора раздался отчаянный лай собачьей своры, в жару погони, в открытое окно влетел напуганный кот и, растопырив лапы, приземлился прямо в середине плодов труда многих недель. «Пока несчастный случай не оборвал мой эксперимент, — писал Гитторф, — положительный столб нарастал, по-видимому, без предела».

Тщательные исследования Жана Батиста Перрена (1895), который показал, что катодные лучи несут отрицательный заряд и что эта отрицательная электризация движется по тому же пути, что и лучи, вызывающие флуоресценцию стекла, и измерения тепла катодных лучей, выполненные Густавом Генрихом Видеманном (1891), были направлены прямо на то, чтобы открыть фундаментальную природу катодных лучей, но в действительности этого не произошло. В 1893 г. Дж. Дж. Томсон объяснял это явление как химическое по своей природе, аналогичное электролизу. Он писал:

«Прохождение электричества через газ, так же как и через электролит ... сопровождается химическими изменениями и подвергается их влиянию; таким образом, химическое разложение нужно рассматривать не просто как случайно сопутствующее электрическому разряду явление, но как существенную черту разряда, без которой он не может существовать» (Томсон, 1893, с. 189).

Эквивалентность катодных лучей и явлений электролиза так прочно вошла в умы большинства физиков, что и термины использовались общие. В 1834 г. Майкл Фарадей назвал «поверхность, на которой ток оставляет разлагающееся тело» «катодом», от греческого *κάθοδος*, что означает «путь вниз», а второй электрод — «анодом» от *ἀνοδος*, «путь вверх». Эти названия были повсеместно приняты и для разрядных трубок.

В своей статье по электролизу Фарадей пошел дальше и, обращаясь к греческому слову «идти» (*ίόν*), писал:

«Я предлагаю различать эти тела, называя те, что идут к аноду, анионами ..., а те, что идут к катоду, катионами; а когда приходится говорить о тех и других вместе, я буду называть их ионами» (Фарадей, 1839, с. 663).

50 лет спустя эквивалентность электролитов и газового разряда считалась общепринятой, но Фарадей еще не думал о проводниках электричества в газах как о частицах. Он рассматривал электрические явления как напряжения и деформации среды. Электрическая сила передавалась подобно тому как передается по длине стержня упругая деформация. В «вакуумных» трубках электрическая сила передавалась деформациями и напряжениями в «эфире». Представления Фарадея были блестяще подтверждены теоретической работой Максвелла и экспериментами Герца, и несогласных было мало.

В нынешнем смысле слова «электрон» было введено на несколько лет раньше, чем эта частица была обнаружена. Профессор Дж. Джонстон Стони (1891) изучал атомную теорию электричества в электролитах, и измерил заряд в 1874 г. В 1891 г. он предложил назвать эти заряды «электронами». Но он очень ясно писал, что это не частицы — просто заряды; у них нет массы, нет инерции. Сэр Оливер Лодж (1906) назвал их «электрическими духами».

Пока Крукс и Гитторф сосредоточились на попытке понять электрические «лучи», многие другие исследователи изучали оптические и континуумные эффекты. «Гейслеровы» трубки широко использовались как источники света для спектроскопии, и основные усилия в физических исследованиях были сосредоточены на попытке понять природу спектральных линий. Именно во время исследований такого типа лорд Рэлей (1906) ввел то, что мы теперь называем «плазменной частотой». Дж. Дж. Томсон предложил для атома модель арбуза, в которой электроны были погружены в положительное желе (как семечки в арбузе), и лорд Рэлей рассчитал частоты, с которыми такие электроны колебались бы, будучи смещены от равновесных положений. Рэлей искал объяснение спектральных серий и смог объяснить бальмеровскую серию для водорода с помощью этой модели. Она не работала ни для какого другого атома, и в конце концов успешной моделью оказалась резерфордская модель с центральным ядром. Тем не менее теория Рэрея по-прежнему продолжает жить, пока мы рассчитываем плазменные частоты и лэгмюровские плазменные колебания.

Трубки Гейслера и Крукса назывались «вакуумными», хотя вплоть до 80-х годов они откачивались либо до «торричеллиевского» вакуума, либо поршневым насосом, верхний предел которого доходил примерно до 0,1 Торр. С появлением тёмлеровского насоса стало возможным понизить давление в трубках примерно до 10^{-2} Торр. Гёде изобрел механический вращающийся масляный насос в 1907 г., а в 1915 г. он изобрел ртутный диффузионный насос, так что с годами вакуум постепенно улучшался.

Поучительны несколько иллюстраций проводившихся опытов. На рис. 1 показана круковская трубка, демонстрирующая влияние давления на разряд. Он назывался «электрическим яйцом». В 80-х годах де ла Рю и Мюллер подробно изучили то, что мы теперь называем кривыми Пашена, и в 1884 г. Гитторф продемонстрировал эффект Пашена в трубке, примерный вид которой изображен на рис. 2. Генерация тепла катодными лучами демонстрировалась в трубке, изображенной на рис. 3, эффект магнитного поля показан на рис. 4, тени на стекле — на рис. 5, механическое воздействие на гребное колесико — на рис. 6.

В. де ла Рю и Г. В. Мюллер затратили годы, чтобы собрать самую большую в мире батарею (14 400 элементов с цинковыми и серебряными электродами в электролите NH_4Cl), и их исследования оптического поведе-

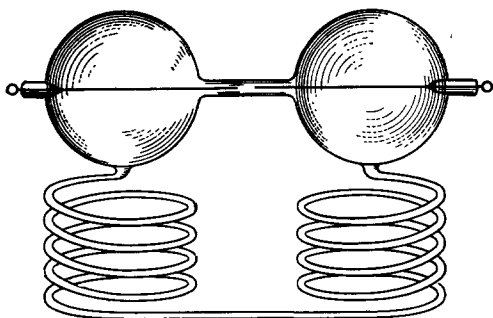


Рис. 2. Демонстрация эффекта Пашена. Когда понижали давление в колбах, разряд горел в длинной трубке, а не в маленьком зазоре между металлическими электродами.

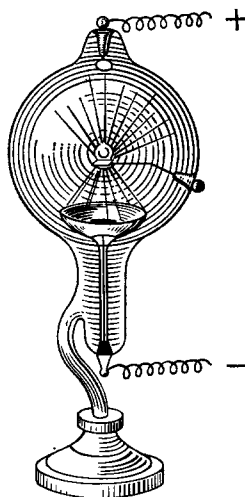


Рис. 3. Эффект нагрева катодными лучами.

Отрицательный электрод был вогнутым, и в центр сферы, частью которой был катод, помещали кусочек платиновой фольги. Когда катодные лучи фокусировались, фольга раскалялась добела.

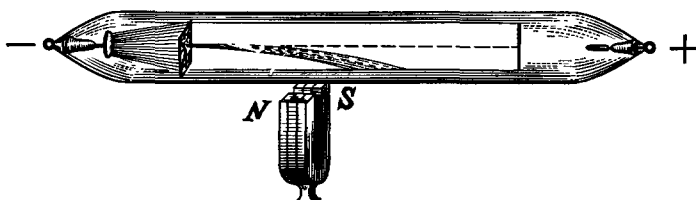


Рис. 4. Отклонение катодных лучей магнитным полем.

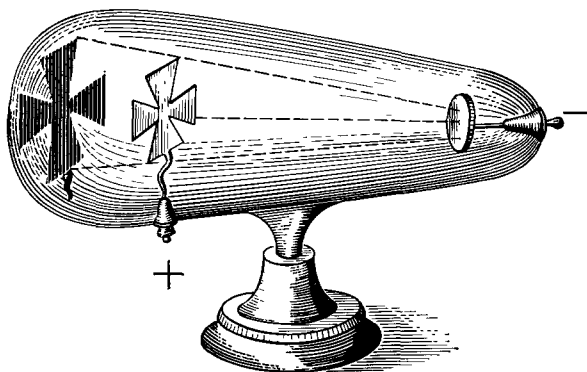


Рис. 5. Катодные лучи распространяются прямолинейно.

Положительным электродом служил крест, вырезанный из алюминиевого листа. На зеленом фоне стекла, возбуждаемого бомбардировкой катодных лучей, появлялась темная тень. Крест помещался на горизонтальном шарнире, так что его можно было убрать с пути лучей, и тень исчезала.

ния разрядов вызвали общее одобрение. Наиболее часто воспроизводимая иллюстрация из статьи, опубликованной ими в 1878 г., показана на рис. 7. Страты были открыты Абриа в 1848 г., и на протяжении последующих

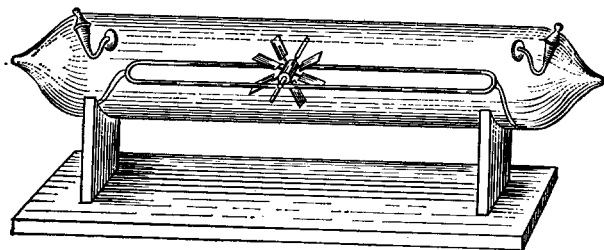


Рис. 6. Трубка с рельсами.

Наблюдалась механическая сила, действующая на тела, на которые попадали катодные лучи. В этой трубке маленькое колесо со слюдяными лопастями можно было заставить катиться от катода к аноду вдоль стеклянной дорожки.

50 лет физики еще изучали эти и другие сложные видимые изменения, надеясь узнать что-нибудь о природе «электрической жидкости». Поведение тлеющих разрядов, в зависимости от давления, геометрии электродов и типа газа, описывалось в научной литературе многие годы; возникли понятия, часть которых используется и сегодня. Это иллюстрируется рис. 8.

Ближе всего к отрицательному электроду (катоде) обычно видно очень тонкое «астроново темное пространство», хотя иногда этому мешает катодное свечение, которое называется по-разному, в зависимости от давления в трубке. Если давление низкое, его часто называют «катодным слоем», и иногда видны два или три таких слоя. При повышении давления и напряжения поверхность катода кажется затянутой бархатистым покровом, о котором всегда говорят как о «катодном свечении». Если катод покрыт оксидным слоем, характеристики свечения меняются (как мы теперь знаем, из-за распыления), его называют «катодным светом».

Следующее темное пространство часто называют «катодным темным пространством», хотя в Англии чаще оно известно как «круксово темное пространство», а в Германии — как «гитторфово темное пространство». Следующая светящаяся область имеет два наименования: ее называют либо «отрицательным свечением», либо «отрицательным столбом». Далее идет сравнительно темное пространство, называемое «вторым отрицательным

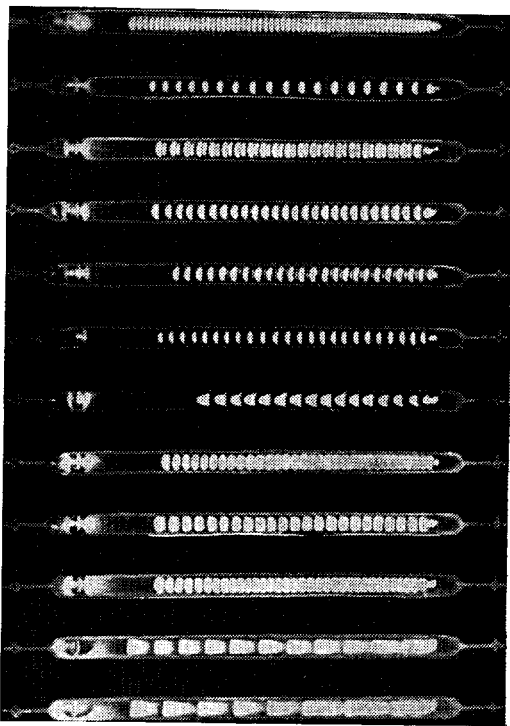


Рис. 7. Проводилось много исследований сложной видимой структуры разряда.

темным пространством» или, чаще, «фарадеевым темным пространством». Протяженность его бывает самой разной, и иногда его вообще нет. С названием «положительный столб», по-видимому, согласны все, хотя способы, которыми оно распадается на «страты», подробно изучаются. «Анодное свечение» и «анодное темное пространство» завершают этот перечень областей.

Интересное историческое обстоятельство — то, как мало фундаментальных сведений почерпнуто из интенсивного изучения этих разрядных

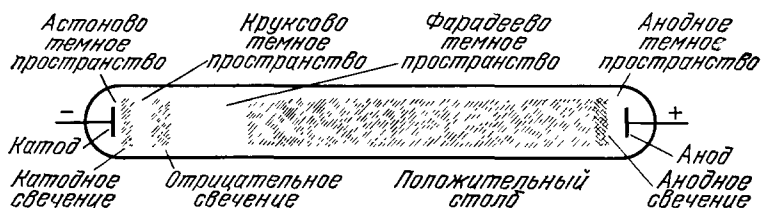


Рис. 8. Перечень различных частей электрического разряда.

«вакуумных» трубок. Несколько поколений физиков накопили впечатляющее количество данных о поведении разрядов и их характеристиках, но пока не начала раскрываться природа этих «лучей», четвертое состояние вещества оставалось загадкой.

В поисках природы электричества был пройден длинный и извилистый путь. Древние греки обнаружили, что потертый чем-либо янтарь начинал притягивать легкие предметы, но вплоть до начала XVII века, когда Уильям Гильберт, английский врач и физик, опубликовал свой трактат «De Magnete» (Гильберт, 1600), не сообщалось о каком-либо последовательном исследовании явлений электричества. Именно Гильберт ввел слово «электричество», назвав стеклянную палочку, потертую шелком, «наэлектризованной», т. е. буквально «наянтаренной». В 1733 г. французский химик Шарль-Франсуа де Шистернэй Дю Фэй обнаружил, что сургуч, потертый кошачьей шкуркой, приобретает заряд, противоположный заряду стекла, потертого шелком, и поэтому ему приписывают открытие двух сортов электричества, которые Бенджамин Франклин назвал «положительным» и «отрицательным». Затем последовали 100 лет догадок о природе «электрического огня». Существовали одножидкостные и двухжидкостные теории, но не было эксперимента, который позволил бы выбрать между ними. Замечательные открытия законов электролиза Майклом Фарадеем относятся к 1833 г. Эти законы немедленно применили к прохождению электричества через газы, но в то время уверенность, что электричество не есть вещество какого-либо рода, была настолько сильна, что эти эксперименты не оказали влияния на установление атомарной природы электричества. Фарадей убедительно писал об электрической силе, передающейся так же, как передается упругая деформация твердого стержня. В вакууме электрические напряжения и деформации передает «эфир». Джеймс Клерк Максвелл изложил эти идеи в математической форме, и когда в 1887 г. Генрих Герц показал экспериментально, что электрические волны распространяются в пространстве, как предсказывала теория Фарадея — Максвелла, доказательство теории «напряжений эфира» было завершено.

На протяжении жизни двух поколений до 1900 г. большинство физиков различали два разных сорта электричества: электролитическую проводимость, создаваемую атомами электричества определенного сорта, и металлическую проводимость, как электрические напряжения и деформации.

На протяжении XVIII века появлялось много сообщений об исследовании утечки заряда с электрически изолированных тел, но самое тщательное было выполнено Кулоном в 1785 г. Кулон учел утечку по нитям, изолировавшим его заряженные тела, и пришел к заключению, что имеет место действительное прохождение электрического заряда через воздух, каковое он приписал молекулам воздуха, заряжающимся при контакте с телом. Поскольку они заряжаются тем же знаком, что и тело, они затем отталкиваются от него.

Через 75 лет после тщательных опытов Кулона, Маттеуччи (1850) измерил скорость утечки в зависимости от давления и показал, что она меньше при низком давлении; а в 1900 г. К. Т. Р. Вильсон пришел к заключению, что утечка примерно пропорциональна давлению. Вильсон также показал, что максимальная утечка пропорциональна

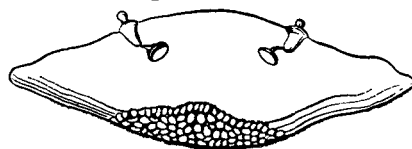


Рис. 9. В круговой трубке этого типа демонстрировалось свечение большого числа химических препаратов, минералов и пород, бомбардируемых катодными лучами.

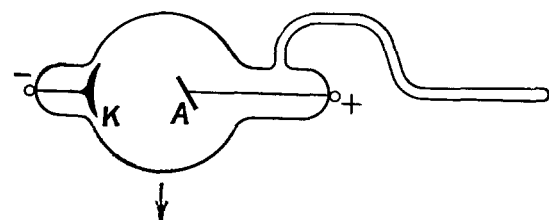


Рис. 10. Круксова «фокусирующая трубка» типа той, которую использовал Рентген для изучения флуоресценции и X-лучей.

объему окружающего сосуда, что не согласовалось с теорией Кулона и вело к предположению, что в этом процессе участвуют какие-то «атомы электричества». Особую природу «электрической жидкости» начали признавать лишь после замечательного открытия X-лучей в 1895 г. Вильгельмом Конрадом Рентгеном, использовавшим круксову трубку обычного типа, и последовавшего годом позже открытия радиоактивного излучения урана Антуаном-Анри Беккерелем. Новый факт, общий для обоих этих открытий, состоял в том, что под действием этих таинственных лучей газ мог становиться проводником.

Открытие Рентгена было чисто случайным. В своей лаборатории в Вюрцбурге он изучал природу флуоресцентного свечения веществ под ударами катодными лучами, явление, которое часто демонстрировали с круксовой трубкой, изображенной на рис. 9. Одним из веществ, особенно сильно реагировавших на такую бомбардировку, был платиноцианид бария. Рентген пытался определить, влияет ли как-нибудь наблюдаемая обычно флуоресценция стеклянных стенок круксовой трубки на платиноцианид бария, находящийся вне трубки. Он выбрал круксову трубку той формы, которую называли «фокусирующей трубкой» (рис. 10), чтобы увеличить рикошет катодных лучей от анода на стеклянные стенки и, следовательно, увеличить флуоресценцию. Изготовив экраны, покрытые нужным веществом, он с воодушевлением обнаружил, что все так и есть, и экраны ярко светятся, когда круксова трубка включена. Принесший ему Нобелевскую премию опыт состоял в том, чтобы прикрыть круксову трубку черной бумагой и удостовериться, что именно флуоресценция стекла вызывает свечение платиноцианида бария. К его удивлению, черная бумага вообще ни на что не повлияла. Ему понадобилось совсем немного времени, чтобы обнаружить, что X-лучи могут «разряжать электрические тела», а также засвечивать фотографическую пленку, причем этот последний эффект вызвал любопытное заявление о приоритете от физика, работавшего с круксовыми трубками в Оксфорде. Фредерик Смит уже обнаружил, что

на фотопластинках, хранящихся в коробке поблизости от трубки, появляется вуаль. Смит не занялся исследованием, а велел своему ассистенту убрать пластинки куда-нибудь еще!

Услышав об открытии Рентгена, Дж. Дж. Томсон в Кавендишской лаборатории тут же вспомнил, что у него тоже есть круксова трубка нужной для получения X-лучей геометрии, и приступил к работе с помощью своего студента, Эрнеста Резерфорда, намереваясь изучить природу газа, становящегося проводником под действием этих новых лучей (Томсон и Резерфорд, 1896). В их экспериментальной установке X-лучи проходили через металлическую коробку, прикрепленную к длинной металлической трубе. В дальнем конце трубы находилась изолированная проволока, соединенная с квадрантным электрометром. Прибор был простой, но проводить опыты было сложно. Представление об этом можно получить из их благодарности в конце статьи:

«В заключение мы хотим поблагодарить м-ра Э. Эверетта за помощь, оказанную нам в этих экспериментах. Время, в течение которого колба дает рентгеновские лучи постоянной интенсивности, невелико, и, поскольку для большей части наших опытов требовалась постоянная скорость эмиссии, неизбежным было использование очень большого числа колб, и все они были изготовлены м-ром Эвереттом» (Томсон и Резерфорд, 1896, с. 392).

Представление об экспериментальных трудностях дает и замечание другого кавендишского физика этой эры, молодого лорда Рэлея, которому приписывают следующие слова о «старом квадрантном электрометре»: «Не знаю, кто его придумал, но ... подозреваю, что первый раз это был черт».

Несмотря на очевидные сложности с техникой, Томсон и Резерфорд провели один из самых важных экспериментов того времени. С помощью пары обычных самодельных кузнечных мехов они прогоняли воздух, подвергшийся воздействию X-лучей, вдоль трубы и измеряли его проводимость электрометром. Они показали, что наэлектризованный газ можно отделить от природного газа, поскольку заряд терялся, когда воздух продували через стекловату или сильное электрическое поле. Газ не подчинялся закону Ома, но при повышении приложенной разности потенциалов ток достигал насыщения; и они пришли к выводу, что рентгеновские лучи создают положительно и отрицательно заряженные частицы, которые стремятся рекомбинировать. Они написали уравнение для этих потерь в форме, которая с тех пор и используется:

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha n^2, \quad \text{или} \quad \frac{1}{n} - \frac{1}{N} = \alpha t.$$

Их основной вывод был следующий: «Аналогия между разведенным раствором электролита и газом, экспонированным в рентгеновых лучах, верна для широкой области явлений».

Томсон и Резерфорд измерили вольт-амперные характеристики проводящего газа и связали их со скоростью заряженных частиц. Они впервые измерили подвижности положительных и отрицательных частиц в воздухе, хлористом водороде, светильном газе и парах ртути. Второй студент Дж. Дж. Томсона, Джон С. Таунсенд, измерил потерю заряженных частиц по мере продувания газа через узкую металлическую трубку и развил теорию ионов, основанную на максвелловской (1867) «Динамической теории газов». Таунсенд (1900) рассчитал коэффициенты диффузии заряженных частиц в тех же газах, которые исследовал Резерфорд. Фарадей показал, что количество электричества, переносимое при электролизе, можно выразить через ne , где n — число молекул в кубическом сантиметре, а e —

заряд. Когда Резерфорд измерил μ , а Таунсенд D , кавендишская группа показала, что

$$ne = \frac{\mu}{D} p$$

дает для ионизованных газов почти то же значение, что и для жидких электролитов.

В то время как его студенты показали, что ne в ионизованных газах близко к найденному в электролитах, Дж. Дж. Томсон измерил отношение e/m для катодных лучей, отклоняя узкий пучок этих лучей в электрическом и магнитном полях. Он не только обнаружил, что измеренное им значение не зависит от используемого газа и от металла электродов трубки, но самым замечательным было заключение, что его e/m почти в тысячу раз больше, чем для заряженного иона водорода при электролизе в жидкости (Томсон, 1897). Он открыл субатомную частицу, в тысячу раз легче водорода, и назвал ее «корпускулой». Лорд Кельвин хотел, чтобы ее называли «электрион», а голландский физик Г. А. Лоренц предложил распространить название «электрон» Стони и на эту частицу. Это название так и осталось.

Электрон был понятием, доступным лишь немногим, и представлялся настолько мало существенным (но не тем, кому он нравился), что уже спустя годы после его открытия тост на ежегодном званом обеде кавендишской лаборатории был: «За электрон: может быть, он никогда никому не понадобится».

В этот исторический момент два томсоновских студента покинули кавендишскую лабораторию, и их пути разошлись. Резерфорд обратился к радиоактивности, а Таунсенд переехал в Оксфорд и основал лабораторию, которая стала самой продуктивной лабораторией в мире в области исследования электричества в газах.

Ясно осознавая природу элементарных заряженных частиц (электрон, положительный ион, отрицательный ион), Дж. С. Таунсенд стал признанным лидером в исследованиях по разряду в газах. Он и его студенты в течение одного поколения доминировали в этой области, накапливая внушительное количество данных, коэффициентов и параметров, характеризующих «прохождение электричества через газ». Таунсенд основывался в своих объяснениях на поведении «среднего электрона» и «среднего иона», и во всей этой области возникла очень механистическая картина. Большое значение придавалось законам подобия, безразмерным и правильно выбранным переменным и коэффициентам, определенным с использованием терминов, характеризующих движение отдельных частиц.

В конце 20-х и начале 30-х годов прогресс в понимании основ физики процессов замедлился, не только из-за ограниченности понятия о «среднем электроде», которое не позволяло появиться новым подходам, но и из-за экспериментальных ограничений — чистоты газа и поверхностей электродов. Серьезность последнего зачастую отвергалась. Самый лучший вакуум получался с помощью ртутного насоса, а давление считывалось с ртутного манометра или манометра Маклеода. В результате примеси ртути так изменяли характеристики разряда, что корреляция с такими фундаментальными константами, как потенциалы ионизации, спектроскопически определенные уровни энергии и поверхностная работа выхода оказывалась слабой.

Тем не менее энергично проводились феноменологические исследования, и, в частности, Лёб (1955) и его студенты в энциклопедическом духе описали детали множества искр, дуг, корон, импульсных разрядов — чрезвычайно разросшийся запас сведений обо всей этой области.

В 1935 г. Морзе, Эллис и Ламар опубликовали статью, ставшую теперь классической: «Распределение скоростей упруго сталкивающихся

электронов», в которой ясно показали преимущество подхода, опирающегося на электронную функцию распределения по энергиям перед методом среднего электрона, при рассмотрении движения частиц в разряде. Начиная с этого времени У. П. Эллис, его студенты и многие другие физики-теоретики получали дивиденды с концепции распределения по энергиям. С появлением ЭВМ вся область «поляризовалась» в этом направлении.

Удалось избавиться и от примесей ртути, которые в течение стольких лет запутывали результаты экспериментов, поставленных с целью связать непосредственно атомные параметры с поведением газового разряда. Первая работа с газом высокой чистоты была выполнена в филиппсовской лаборатории в Эйндохене (Дрювестейн и Пеннинг, 1940). Вскоре после этого были развиты техники сверхвысокого вакуума и газов чистоты лучше, чем спектроскопическая, и стало возможным реальное сопоставление теории и эксперимента.

Название области газовой электроники радикально менялось несколько раз за последние сто лет. Занимаясь написанием продолжения «Трактата об электричестве и магнетизме» Джеймса Клерка Максвелла, Дж. Дж. Томсон добавил главу «Прохождение электричества через газы» со следующей сентенцией:

«То значение, которое Максвелл придавал исследованию явлений, сопровождающих прохождение электричества в газах, и то обстоятельство, что в английских учебниках нет обзора весьма обширной литературы по этому предмету, позволяя мне думать, что краткий очерк последних исследований электрического разряда этого типа не будет неуместным в этой книге» (Томсон, 1893, с. 189).

Много лет эту область называли «прохождением электричества через газы» или «электрический разряд в газах». Постепенно название сократилось до физики «газового разряда». С ростом популярности области электроники во время второй мировой войны и после нее, название снова изменилось — на «газовую электронику». В наши дни, когда внимание сконцентрировано на использовании ионизированной среды в управляемых термоядерных реакторах, название специфического вида электрического разряда, который определяют как плазму, стараются деформировать так, чтобы включить всю эту область; и некоторые используют термин «физика плазмы» как синоним «газовой электроники».

Леви Тонкс опубликовал рассказ о том, как Ирвинг Лэнгмюр ввел слово «плазма» в 1928 г.:

«Однажды Лэнгмюр зашел в мою комнату в Исследовательской лаборатории «General Electric» и сказал: «Слушайте, Тонкс, я ищу слово. В этих газовых разрядах мы называем область непосредственно вблизи стенки или электрода слоями, и это, по-видимому, подходит; но как назвать основную часть разряда?... Там полная нейтрализация пространственного заряда. Не хочется изобретать слово, но оно должно описывать эту область, как отличающуюся от слоев. Что бы Вы предложили?».

Мой ответ был классическим: «Надо подумать, д-р Лэнгмюр».

На следующий день Лэнгмюр влетел и объявил: «Я знаю, как это назвать! Мы назовем это — плазма». Мне тут же представилась плазма крови: кажется, Лэнгмюр даже упомянул о крови» (Тонкс, 1967, с. 857). Но Лэнгмюр был не из тех, кого пугают представления других людей — даже в словотворчестве, — и, как прилежный студент, изучающий греческий, он исследовал этимологию слова. Он был под впечатлением такого легко наблюдаемого свойства тлеющего разряда, как изменение формы в соответствии с формой трубки, и он выбрал греческое слово *πλάσμα*, означающее «формировать»; это слово стало общеупотребительным, когда проблемы управляемого термоядерного синтеза привлекли большое число

Таблица

Год	Понятие	Авторы
1600	Электричество	Гильберт
1742	Искры	Дезагюлье
1808	Диффузия	Дальтон
1808	Дуга (разряд)	Дэви
1817	Подвижность	Фарадей
1821	Дуга (название)	Дэви
1834	Катод и анод	Фарадей
1834	Ионы	Фарадей
1848	Страты	Абриа
1860	Свободный пробег	Максвелл
1876	Катодные лучи	Гольдштейн
1879	Четвертое состояние вещества	Крукс
1880	Кривая Папена	де ля Рю и Мюллер
1889	Распределение Максвелла—Больцмана	Нернст
1891	Электрон (заряд)	Стони
1895	X-лучи	Рентген
1897	[Циклотронная] частота	Лодж
1898	Ионизация	Крукс
1899	Уравнения переноса	Таунсенд
1899	Уравнение роста энергии	Лорени
1901	Коэффициенты Таунсенда	Таунсенд
1905	Диффузия заряженных частиц	Эйнштейн
1906	Электрон (частица)	Лоренц
1906	[Плазменная] частота	Рэлей
1914	Амбиполярная диффузия	Зеелигер
1921	Эффект Рамзауэра	Рамзауэр
1925	Дебаевская длина	Дебай и Хюккель
1928	Плазма	Лэнгмюр
1935	Функция распределения по скоростям	Эллис

физиков, которые начали называть свою рабочую «жидкость» лэнгмюровской плазмой.

Даже краткая история газовой электроники никогда не кончится, поскольку прогресс продолжается все время, постоянно добавляются новые понятия и новые термины, и главный фокус внимания работающих в этой области все время смещается и расширяется. Однако полезно осознавать, что мы стоим на давних традициях, и многие слова нашего языка, относящиеся к этой области, возникли раньше, чем наше нынешнее понимание физики явлений, которые мы обозначаем этими словами. Некоторые наши понятия в свое время произросли так естественно из существа дела, что трудно точно указать их происхождение. У других, напротив, можно указать определенные даты и авторов. Заканчивая эту краткую историю, мы нарочито отделили в таблице некоторые из этих вех прогресса на пути к нашему нынешнему пониманию области газовой электроники.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Abria A.— 1848, Ann. Chim., t. 7, p. 477.
 Coulomb C. A.— 1785, Mem. Ac. Sci., p. 612.
 Crookes, Sir William.— 1879a, Lecture on «Radiant Matter» delivered to the British Association for Advanced Sciences — August 22; 1879b, Phil. Trans., pt. I, p. 152.
 Davy H.— 1821, Ibid., v. 111, p. 427.
 De la Rue W., Müller H. W.— 1878, ibid., v. 169, p. 155.
 Druyvesteyn M. J., Penning F. M.— 1940, Rev. Mod. Phys., v. 12, p. 87.
 Dunman T.— 1891, A Short Text Book of Electricity and Magnetism — Lnd.: Ward, Lock, Bowden and Co.— P. 158.
 Faraday M.— 1839, Res. Electr.— P. 663.
 Gilbert W.— 1600, De Magnete, Magneticisque Corporibus.— Lnd: Petrus Short.

- Goldstein E.—1876, Berl. Monat., S. 283.
Hittorf J. W.—1869, Pogg. Ann., Bd. 136, S. 8; 1884, Wied. Ann., Bd. 21, S. 96.
Lodge O.—1906, Electrons.—Lnd: George Bell and Sons.—P. 36.
Loeb L. B.—1955, Basic Processes of Gaseous Electronics.—Berkeley: Univ. of California Press.
Matteucci C.—1850, Ann. Chim. Phys., v. 28, p. 390.
Maxwell J. C.—1867, Phil. Trans. Ser. A, v. 157, p. 49.
Morse P. M., Allis W. P., Lamar E. S.—1935, Phys. Rev., v. 48, p. 412.
Perrin J. B.—1895, C.R. Ac. Sci., t. 121, p. 1130.
Plücker J.—1859, Pogg. Ann. Bd., 107, S. 77.
Rayleigh, Lord.—1906, Phil. Mag., v. 11, p. 117.
Röntgen W. C.—1895, Sitzungsber. Würzburger Phys. und Med. Gesellschaftswiss. Jahrb.
Stoney G. J.—1891, Sci. Trans. Roy. Dublin Soc., v. 4, p. 563.
Thomson J. J.—1893, Recent Researches in Electricity and Magnetism — Lnd: N.Y. Oxford Univ. Press — P. 189; 1897, Phil. Mag., v. 44, p. 298.
Thomson J. J., Rutherford E.—1896, *ibid.*, v. 42, p. 392.
Tonks L.—1967, Am. J. Phys., v. 35, p. 857.
Townsend J. S.—1900, Phil. Trans. Ser. A, v. 193, p. 129.
Wiedemann G. H.—1891, Sitzungber. Phys. und Med. Soz. Erlangen.
Wilson C. T. R.—1900, Proc. Cambr. Phil. Soc., v. 11, p. 32; Proc. Roy. Soc., v. 68, p. 151.