http://www.icfcst.kiev.ua/MUSEUM/TXT/Diode_r.pdf

История создания полупроводникового диода (детектора)

Подготовлено:
Коженевский С.Р.
Вечер В.В.
30.10.2012

То, что сегодня - наука, завтра - техника.
Эдвард Теллер

Вступление

Кому дано право квалифицировать новую технологию как радикально новую, или говоря языком журналистов — революционную? Этот вопрос волновал многих ученых мира. На наш взгляд, самый полный ответ на этот вопрос дал историк, исследователь развития электроники и электротехники, руководитель школы коммуникаций в Вестминстерском университете, профессор Браян Винстон (B.Winston) в своей книге "Media Technology and Society. A History: from the Telegraph to the Internet": *"...термин "революция" является риторическим приемом и его вообще совершенно неверно применять для описания развития информационных и коммуникационных технологий. В действительности же в исторической летописи можно наблюдать более медленный темп изменений, чем предполагается, а также регулярность в появлении инновационных структур и их последующее массовое распространение, которое может стать моделью для всех таких изменений"*. Одним из примеров такой "революции" может быть история развития полупроводниковой техники.

Конструкции первых точечных диодов (Музей ООО "ЕПОС")

Разработки в сфере информационных и коммуникационных технологий чаще всего относят к "компьютерным наукам", но дать определение, что же такое "компьютерные науки" достаточно сложно: одни считают их фундаментальными науками, другие — междисциплинарными научно-техническим исследованиями, третьи — новой кибернетикой. Однако по отношению к науке, знание компьютера занимает такое же положение, как знание физических инструментов относительно к физике. Зачастую к компьютерным наукам относят знания в области информационных систем, средств коммуникации, автоматизации и контроля, средств математического моделирования, а также средств автоматизированного проектирования. Но по сути дела, все это возникло первоначально из электроники. Поэтому,

исследуя историю полупроводниковой техники как составной части истории возникновения электроники, мы одновременно рассматриваем и предпосылки того, что сейчас называют компьютерной революцией.

Первые опыты с полупроводниками

Полупроводники, как новый материал для электротехники, стали применять только в середине прошлого века, а термин полупроводники был впервые предложен и использован в публикации немецкого физика Кенисберга в 1914 году.

Первые же исследования полупроводников были проведены Майклом Фарадеем в 1833 году. Продолжая работы своего учителя Хэмпфри Дэви, Фарадеем был установлен тот факт, что электропроводность сернистого серебра с ростом температуры повышается в отличие от металлов, у которых она с ростом температуры падает. В последующие годы Фарадей наблюдал такие же эффекты еще в ряде различных материалов, чем собственно и открыл новое направление в экспериментальной физике — физику полупроводников или как называли ее в то время — кристаллофизику. Но как отдельная отрасль науки, физика полупроводников отделилась от общей физики только в 1930-х годах.

В то время исследователи не имели ни теоретической, ни экспериментальной базы для исследования полупроводников, поэтому на некоторое время изучение полупроводниковых кристаллов производилось очень медленно и оставалось в тени изучения других направлений в физике. Так продолжалось до тех пор, пока в 1873 году не было обнаружено, что сопротивление материала селена (Se), который использовался для изоляции телеграфного кабеля, изменяется при освещении. Это открытие произошло чисто случайно во время проведения работ по прокладке телеграфного кабеля между Англией и континентальной Европой. Поэтому именно работы в новой отрасли (электромагнитный телеграф) привели к началу использования полупроводниковых материалов в электротехнике.

Изобретение электрического телеграфа

До середины XIX века основным и единственным видом связи между континентами была пароходная почта. О событиях и новостях из других стран люди узнавали с опозданием на целые недели, а иногда и месяцы. Поэтому создание электрического телеграфа явилось "революцией" в коммуникации людей. После того, как эта техническая новинка появилась в большинстве стран, а земной шар опоясали телеграфные линии, необходимы были только часы или минуты, чтобы важнейшие новости стали известными на всех континентах земного шара. Электрический телеграф явился одним из важнейших изобретений в истории человечества и подтолкнул ученых к бурному развитию средств связи.

Для работы электрического телеграфа использовался электрический ток, который практически со скоростью света перемещался по проводникам и переносил сообщения на большие расстояния. Каждое новое открытие в

электричестве практически сразу же находило применение в различных способах связи.

Схема электрического телеграфа рождалась с большими мучениями, так как все ее элементы были на то время техническими новинками. В качестве источника электричества использовались электрические "сухие" батареи. Недавно изобретенные электромагнитные реле нашли применение в качестве усилителей-коммутаторов. Исследовались различные металлы в качестве электрических проводов, а для них проводились поиски изоляции. Выбирались способы регистрации передаваемых телеграфных сигналов, создавалась система их кодирования и ретрансляции.

Одним из самых важных открытий в телеграфии было то, что сообщения можно было передавать по одному проводу, если заземлить его другой конец в точке приема. После этого стали на одной станции тракта передачи заземлять положительный полюс батареи, а на другой – отрицательный, при этом отпала необходимость тянуть второй провод, как это делали в начале. "Земля" при этом являлась проводником для обратного тока.

Самую большую роль в становлении электрического телеграфа сыграл Сэмюэл Морзе. Он потратил большую часть жизни на развитие этого средства связи. Несмотря на то, что по профессии он был художник и очень слабо разбирался в теоретических вопросах электричества, его настойчивость и способность в привлечении нужных людей, позволили создать гениально простую систему передачи сообщений по проводам на большие расстояния. Практически все Сэмюэлю Морзе приходилось делать самому. Во время азработки схемы своего телеграфа он наделал много ошибок, находя и исправляя которые, развивал практику электросвязи. Благодаря его опытам стало понятно, что необходима надежная изоляция оголенных электрических проводов; для усиления слабых сигналов, передаваемых по линии, необходимо применение электромагнитного реле; цепь передачи сообщений должна состоять из многих следующих друг за другом простых сегментов телеграфного тракта. Первую телеграфную линию длиной 64 км прокладывали между Вашингтоном и Балтимором. Ее решили прокладывать под землей, но вскоре выяснилось, что изоляция не выдержала сырости и образовалось большое количество коротких замыканий в линии. Времени на разбирательство с изоляцией не было и провода стали подвешивать над землей на специальных телеграфных столбах.

Разработанная схема телеграфного аппарата Морзе была проста и очень эффективна. Поэтому этот электрический телеграф получил широчайшее распространение в мире, а разработанная под руководством Морзе система кодирования сообщений используется и сегодня в любительской радиосвязи.

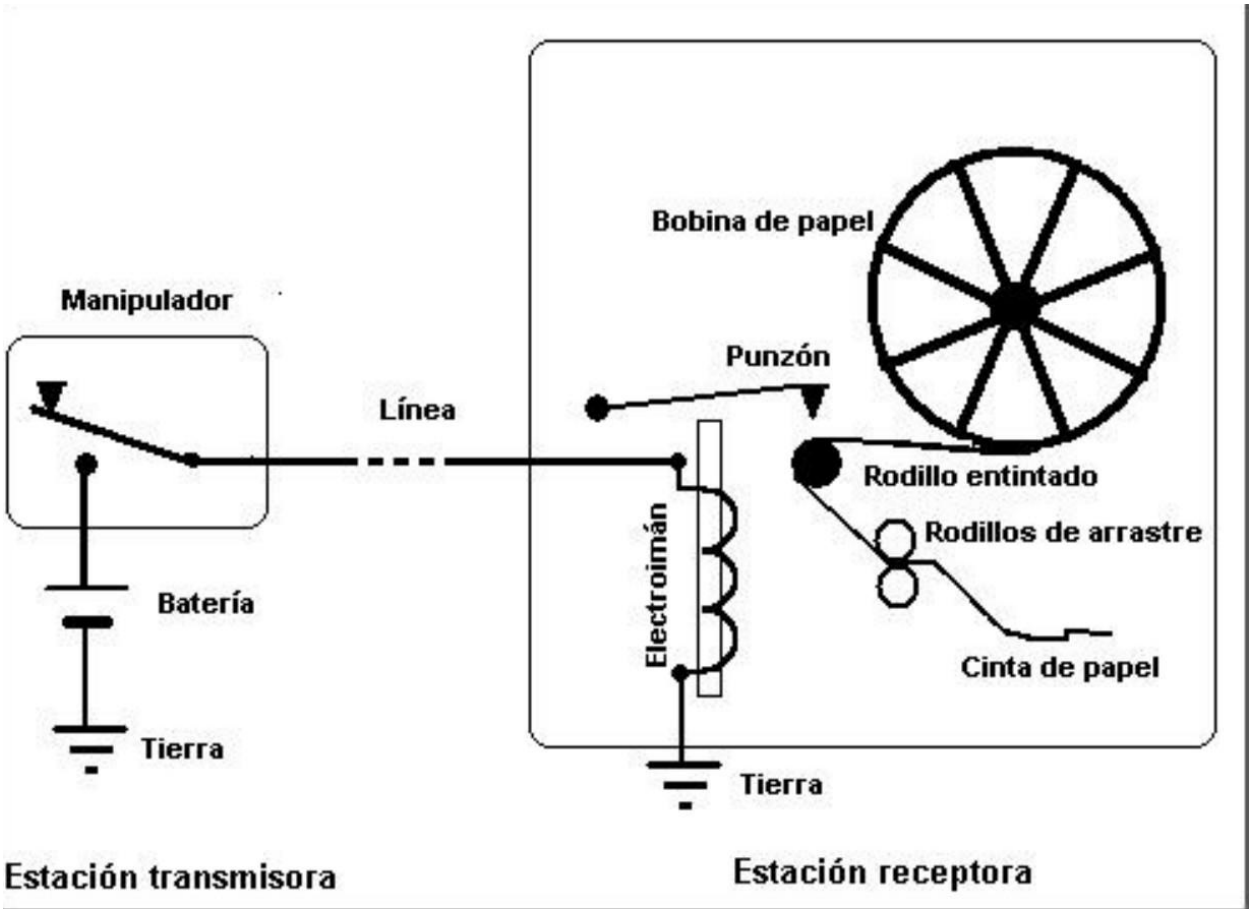


Схема электрического телеграфа С. Морзе

В первых своих опытах Морзе использовал для своей цели только одну электрическую батарею, поэтому передать сигнал на исполнительное устройство он мог только на небольшое расстояние. Чем длиннее был провод, тем больше было его сопротивление. Тонкий электрический провод легко разрывался. Поэтому в дальнейшем телеграфные провода стали делать или большого сечения или же в виде многожильного плетеного кабеля.

Изоляция проводов доставляла также много неприятностей. Необходим был кабель большой протяженности, прочности и изолированности, чтобы прокладывать его под водой на большие расстояния и на больших глубинах.

Попытки соединить электрической связью континентальную Европу и Англию начались еще в 1840 году, когда английский профессор Уитстон представил на рассмотрение парламента проект прокладки подводного электрического кабеля от английского Дувра к французскому берегу, но не получил согласия, соответственно и денег. Идею прокладки под водой телеграфных кабелей, через два года перехватил Семюэль Морзе, который к тому времени уже связал телеграфным кабелем берега бухты Нью-Йорка и обеспечил передачу по нему сообщения с использованием собственного запатентованного кода— кода Морзе. В коде Морзе буквы представляются комбинациями коротких и длинных сигналов — "точек" и "тире". Тогда же он предсказал, что скоро телеграф свяжет Старый Свет с Новым. Что собственно и произошло через десятилетие. Правда, телеграфная связь проработала всего лишь один месяц, после чего телеграф замолк навсегда.

Основной причиной быстрого выхода из строя телеграфной линии было низкое качество изоляции электрических проводников. В то время основными материалами для их изоляции служили натуральные полимеры: каучук и гуттаперча, а снаружи кабель обвивался броней из стальной проволоки. Для прибрежных участков броню на кабеле изготовляли в два, а то и в три слоя для защиты от рыбацких снастей и якорей кораблей.

В 1873 году английский физик У. Смит предложил использовать в качестве изоляции селен. Технология изоляции была следующей: селен нагревали до температуры 220 – 230 °С, при которой он переходил в жидкую фазу, а после этого его наносили на медный проводник в качестве изолятора. После остывания селенового слоя получалась сравнительно толстая "стеклянная" изоляция на телеграфном кабеле. При испытаниях этого кабеля в качестве телеграфной линии он обнаружил интересное явление: при освещении даже очень слабым "лунным" светом удельная проводимость кабеля изменялась. Причиной такого явления оказались интересные эффекты, обнаруженные в изоляционном материале кабеля. Именно эти эффекты легли в основу первых селеновых фотосопротивлений, серийное производство которых началось в 1876 году.

Справка: Селен — химический элемент 16 группы, 4-го периода в периодической системе Менделеева, имеет атомный номер 34, обозначается символом Se (лат. Selenium).

Селен был открыт в 1817 году Берцелиусом и Ганном при исследовании осадков, которые образовывались в свинцовой камере при производстве серной кислоты. Новый элемент из-за химического сходства с элементом Теллур (Te) был назван греческим словом "селен", что означает "луна". Почти пятьдесят лет селен оставался лабораторной редкостью. Начиная с 1873 года, селен начал применятся для создания фотоэлементов и этот год явился началом широкого проникновения селена в различные отрасли промышленности. На сегодняшний день селен находит применение в металлургии, химическом производстве, электронике и медицине.

В природе селен встречается в составе около 50 минералов, тем не менее, содержание селена в земной коре не превышает $1{,}4*10^{-5}$%. Минералы, содержащие селен представляют собой большой частью селениды тяжелых металлов, такие как берцелианит Cu_2Se, науманинит Ag_2Se и другие. Селен обычно присутствует в сульфидах: пирите, галените, халькопирите, — в концентрациях порядка сотых процента. Наиболее крупные запасы селена приурочены к гидротермальным сульфидным месторождениям — колчедановым, медно-цинковым, медно-молибденовым и полиметаллическим.

В современной промышленности селен получают несколькими способами:

- Извлечением из медьсодержащих электролитных шламов и шламов сернокислотного и целлюлозно-бумажного производства;
- Извлечение из побочных продуктов свинцового производства;
- Получение вторичного селена из утилизации копировального оборудования.

Селеновые фотосопротивления стали использоваться в различных оптических приборах. Возникла потребность объяснить причину этого явления и начать поиск новых светочувствительных материалов. Так на рубеже двадцатого столетия физики начали детально изучать различные

материалы, которые по их свойствам нельзя было отнести ни к проводникам, ни к диэлектрикам.

Физические процессы в полупроводниках

Формирование представлений о физических процессах, происходящих в полупроводниках, затруднялось многообразием обнаруженных явлений. Проводя их исследования, член Национальной американской академии Эдвин Г. Холл в 1879 г. открыл гальваномагнитный эффект в полупроводнике с током, помещенном в магнитное поле. Сутью этого явления было возникновение поперечного электрического поля и разности потенциалов в полупроводнике, по которому проходит электрический ток, при помещении их в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока. Теоретики тех лет могли объяснить поведение электронов в металлах, но объяснить такое поведение полупроводников в магнитном поле они не могли.

Тем не менее, уже в начале XX века природа электропроводности полупроводников получила правильное объяснение. Этому успеху в значительной степени способствовали работы немецкого электрохимика И. Кенигсбергера.

Кенигсбергер рассуждал следующим образом. Проводимость определяется величиной тока, который протекает через сечение площадью 1 $м^2$, под действием электрического поля напряженностью 1 В/м. Поскольку электрический ток - это упорядоченное движение заряженных частиц, то он будет зависеть от концентрации этих частиц, скорости их упорядоченного движения и величиной переносимого каждой частицей заряда:

$$Q=N*v*q \quad (1)$$

Таким образом, Кенигсбергер предполагал, что изменение электрической проводимости полупроводников зависит от концентрации в нем электронов.

Заряд частицы q является постоянным, не зависящим от температуры. Поэтому данную величину можно исключить из списка факторов, обуславливающих зависимость проводимости от температуры.

Скорость движения частиц *v* с температурой возрастает. Но тепловое движение частиц является не упорядоченным, а хаотичным. Возрастание скорости хаотичного движения увеличивает число столкновений этих частиц друг с другом, и в результате скорость упорядоченного переноса заряда *v* (а именно это является обязательным признаком электрического тока) уменьшается. В результате проводимость должна уменьшаться с ростом температуры, что мы и наблюдаем в металлах.

Остается предположить, что с возрастанием температуры в полупроводниках увеличивается концентрация частиц - носителей заряда. Причем это увеличение настолько велико, что перекрывает тепловое уменьшение скорости упорядоченного переноса заряда.

В своей работе, опубликованной Кенигсбергергом в 1906 году, он писал: *"При повышении температуры в оксидах и сульфидах число проводящих ими свободных квантов электричества - электронов - увеличивается, пока не станет предельным, после чего их поведение уподобляется металлам, в которых при нормальной температуре почти все электроны свободны"*.

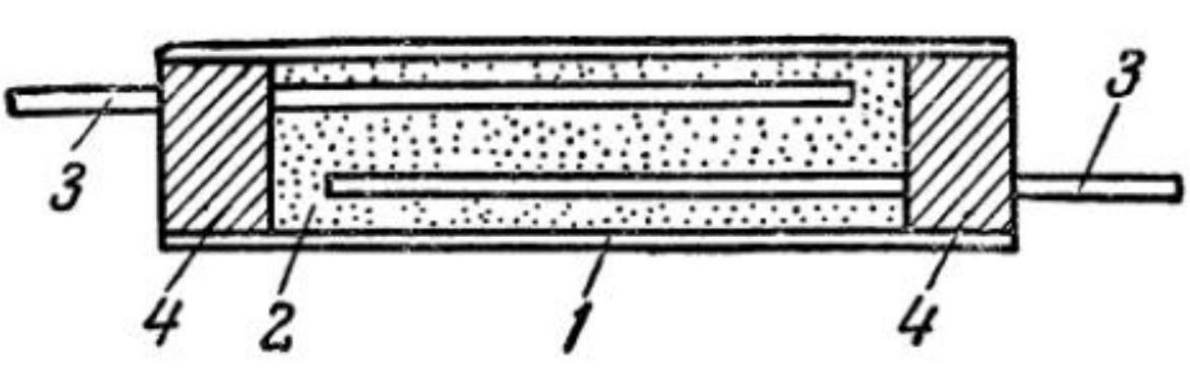
Помимо характерной температурной зависимости в проводимости, класс полупроводников с точки зрения Кенигсбергера характеризуется еще несколькими основными свойствами:

- величиной их удельного сопротивления в пределах от 10^{-8} до 10^{1} Ом*м;
- большими значениями их термо-ЭДС в паре с металлом;
- несоблюдением закона Ома на контакте полупроводник-металл;
- их чувствительностью к свету.

Эра кристаллического детектора

Следующим этапом, который приблизил развитие твердотельной электроники, стало создание первого кристаллического детектора. Собственно говоря, детекторы стали логическим продолжением развития технологий связи. В 1895 году Александр Попов провел первые эксперименты, которые подтвердили возможность телеграфирования сообщений с использованием электромагнитных волн. Независимо от Попова, в Великобритании Маркони провел аналогичные эксперименты с опозданием в несколько месяцев. Таким образом Попов и Маркони открыли эру телеграфии без проводов.

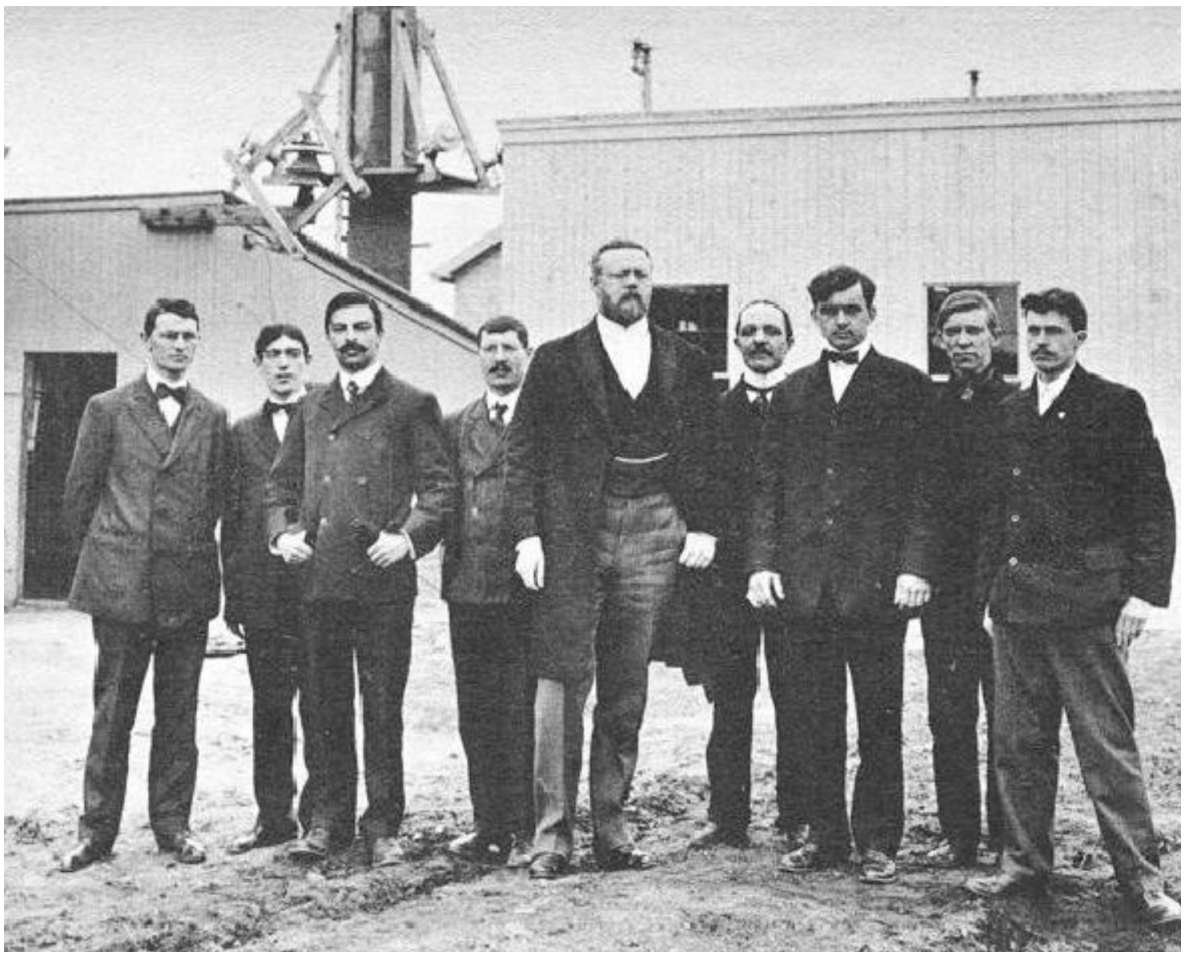
В своих опытах Александр Попов использовал новый прибор — детектор радиоволн (когерер). Устройство когерера показано на рисунке. Он представлял собой небольшую колбу заполненную металлическими (окисленными) опилками, которые заполняли промежуток между двумя металлическими электродами. Электродами служили платиновые проволочки, так как этот металл очень стойкий к коррозии. В данной схеме когерер выступал в роли детектора радиосигнала.



Конструкция когерера (вид сверху).
1-стеклянная трубка, 2-железный порошок, 3-платиновые электроды, 4-пробки

Работа когерера основывалась на том, что его сопротивление уменьшается в несколько десятков раз при приложении к нему незначительного высокочастотного электромагнитного поля. При этом металлический порошок (опилки) намагничиваются и слипаются друг с другом, обеспечивая лучшую электрическую проводимость. Сопротивление такого намагниченного порошка резко уменьшается. Таким образом когерер выполняет функцию преобразования электромагнитного сигнала высокой частоты в электрический ток низкой частоты, другими словами осуществляется детектирование радиосигнала. Поповым было обнаружено, что если подсоединить телефонную трубку к выводам когерера, то в моменты прихода электромагнитного сигнала слышны щелчки разной длительности, то есть когерер выделяет (детектирует) низкочастотную составляющую электромагнитного сигнала.

В 1903 году работник компании NESCO (National Electric Signal Company) Реджинальд Обри Фессенден получил патент на "жидкостный бареттер" — детектор, основанный на свойствах зоны соприкосновения электрода и электролита. Это устройство стало важнейшим открытием со времен когерера — благодаря его использованию была осуществлена первая голосовая связь. Из дневника Фессендерна: "Во время первых испытаний были переданы не только речь, но и записанные на фонографе речевые сообщения и музыка. Все получаемые радиосообщения отличались четкостью и разборчивостью и в этом отношении заметно выигрывали по сравнению с обычными линиям проводной связи".



Реджинальд Фессенден в центре с сотрудниками. Брант-Рок. 1906.

Несмотря на начало применения для передачи голосовых сообщений с 1903 года радиосвязи, беспроводные телеграфы существовали еще более 20 лет. А первые голосовые вещательные радиостанции появились только в 1915 году.

В 1906 году американский инженер Гринлиф Виттер Пиккард получает патент на изобретение кристаллического детектора. В своей патентной заявке он пишет: "Контакт между тонким металлическим проводником и поверхностью некоторых материалов с кристаллической структурой (кремний, пирит, галенит, германий и др.) выпрямляет и вызывает демодуляцию высокочастотного тока, который возникает в антенне при приеме радиоволн". Тонкий металлический проводник, с помощью которого осуществляется контакт с поверхностью кристалла, внешне очень напоминал кошачие усы, поэтому в технической литературе часто встречается название этого детектора — "кошачий ус" Пиккарда.

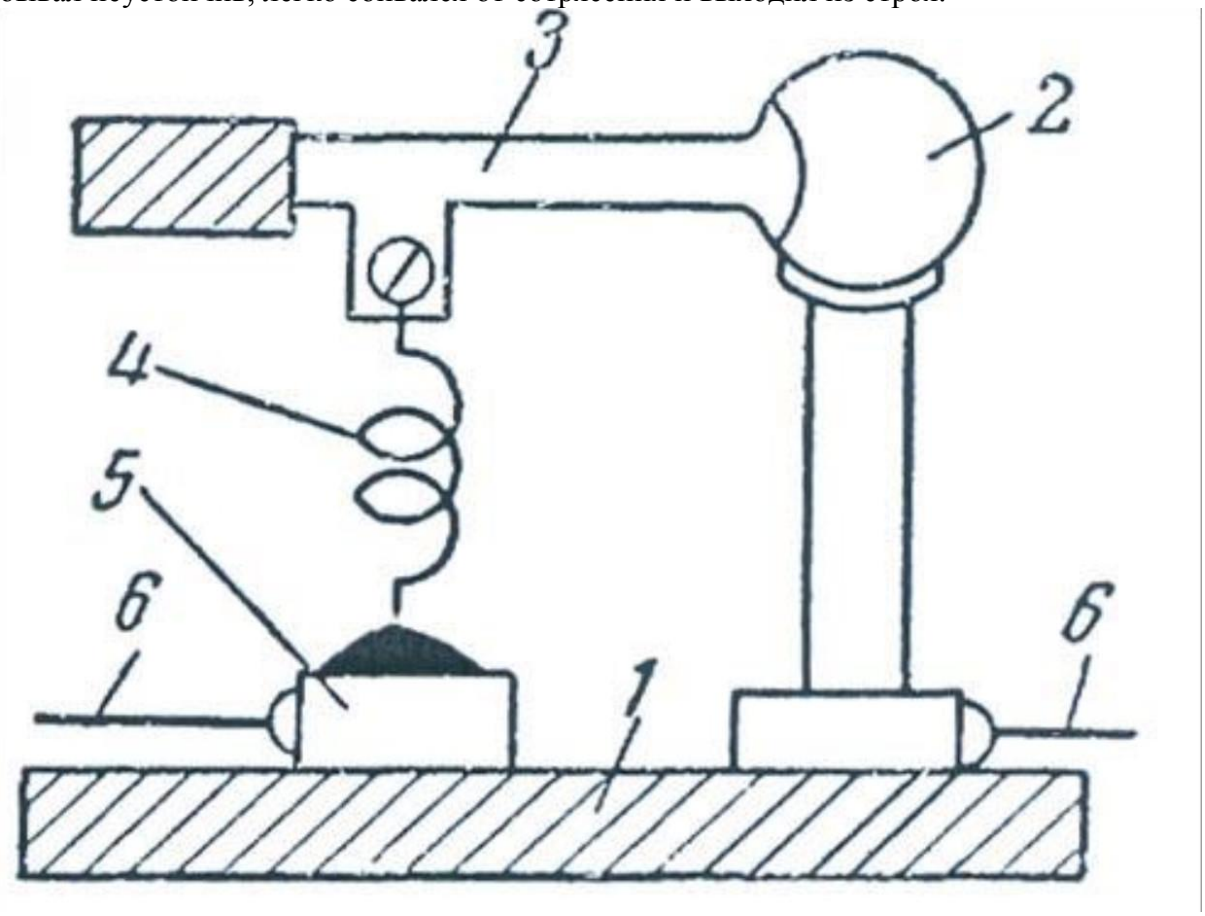
Один из первых кристаллических детекторов —
"Кошачий ус" Пиккарда

Справка. Последующее развитие радиотехники привело к тому, что кристаллический детектор получил всеобщее признание, как необходимый и существенный элемент приемного устройства, обеспечивающий демодуляцию принимаемого сигнала. До первой мировой войны во всех приемных устройствах коммерческого и военного типов всегда фигурировал кристаллический детектор, выполнявший функцию преобразователя сигнала высокой частоты в сигнал низкой частоты.

В период первой мировой войны, когда в радиотехнику начала внедряться электронная лампа, появились первые ламповые детекторы. Сначала для этой цели применялись двухэлектродные, а потом и трехэлектродные лампы. Ламповые детекторы обладали одним существенным преимуществом по сравнению с кристаллическими детекторами того времени. Они обеспечивали надежную и устойчивую работу приемника, чего нельзя было тогда добиться при помощи кристаллических детекторов.

Кристаллические детекторы изготовлялись в то время из естественных кристаллов различных минералов — свинцового блеска, цинкита, пирита и ряда других, являющихся проводниками электрического тока с низкой электропроводностью (полупроводниками). При наличии точечного контакта одного из этих полупроводников с острием тонкой металлической проволоки, свернутой в виде пружинки, можно было добиться эффекта детектирования. Не все точки поверхности кристалла обладали "чувствительностью" к детектированию. Только при слабом нажатии пружинки на поверхность кристалла детектирование получалось хорошим. Оператору при настройке приемника приходилось, таким образом, помимо настройки высокочастотных цепей заниматься еще настройкой детектора, так как постоянный контакт между металлической пружинкой и кристаллом в детекторах того времени отсутствовал. Пружинка обычно укреплялась на специальных

шариковых шарнирах, позволявших вручную регулировать контакт (рис). Контакт часто бывал неустойчив, легко сбивался от сотрясения и выходил из строя.

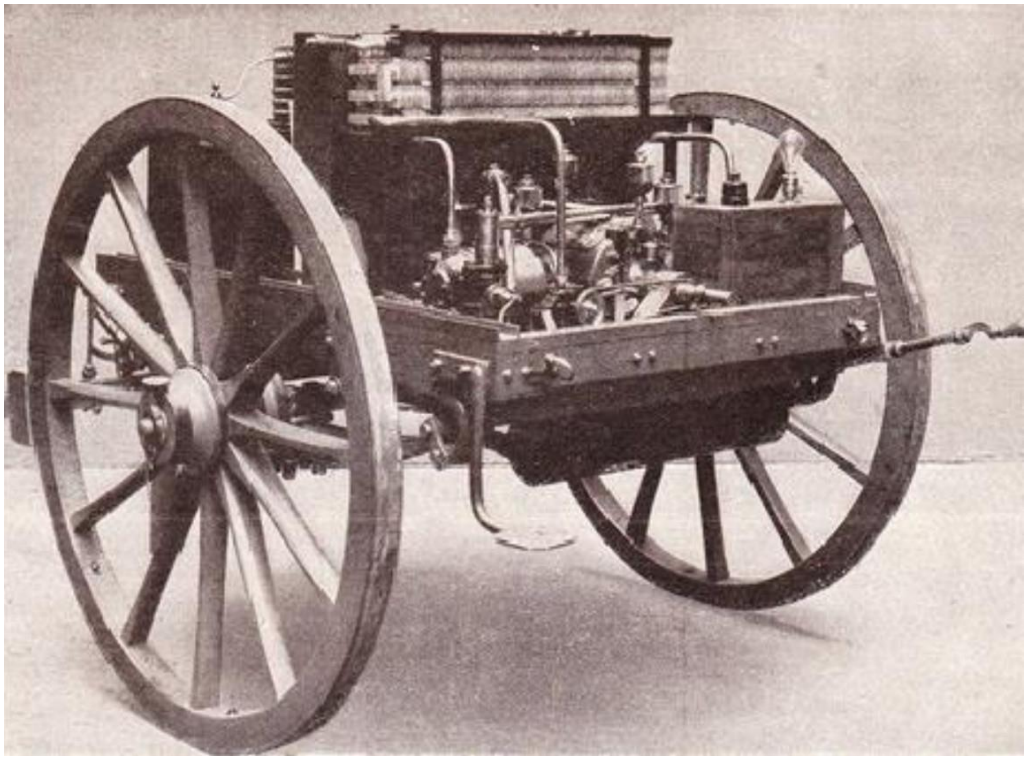


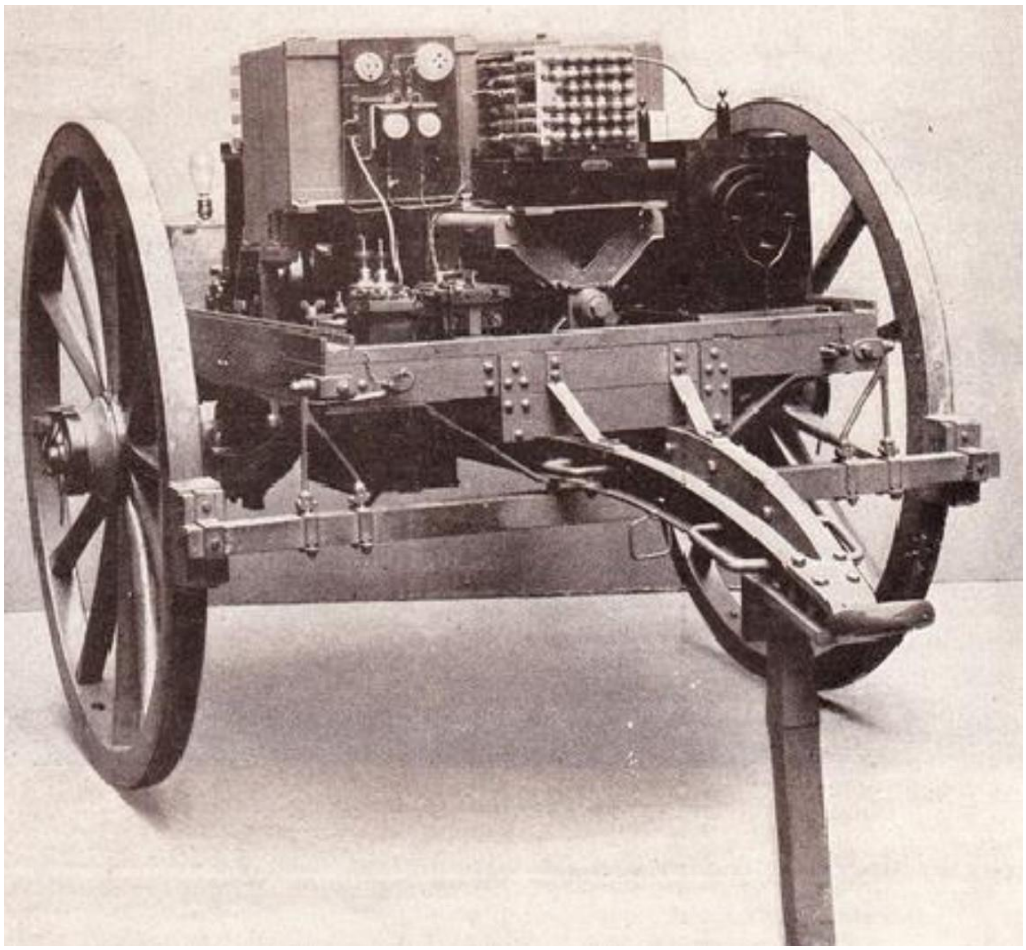
Конструкция первых кристаллических детекторов
1-основание; 2-стойка с шарниром; 3-рыжачок; 4-контактная пружинка;
5-чашечка с кристаллом 4; 6-выводы.

Таким образом, кристаллический детектор, сыгравший исключительно большую положительную роль в первый период развития радиотехники, обладал в то же время рядом недостатков, которые стали выявляться по мере того, как к аппаратуре начали предъявляться более жесткие требования. Главным недостатком кристаллического детектора, являлись его неустойчивость в работе и сложность настройки.

В это же время на кристаллические детекторы обратили внимание ряд компаний из разных стран мира. Радиосвязь очень интересовала военных. На некоторое время кристаллические детекторы становятся предметом исследований. Так, к примеру, компания Маркони вкладывает тысячи фунтов стерлингов в исследования и производство кристаллических детекторов. Согласно архивным документам Российской Академии Наук РАН, в дореволюционной России исследованиями и производством кристаллических детекторов занималось Русское общество беспроволочных телеграфов и телефонов (РОБТиТ), которое было создано в г.Киеве Семеном Моисеевичем Айзенштейном в 1906 году на собственные средства. А уже в 1908 году в Санкт-Петербурге указом царя Николая II было создано акционерное общество РОБТиТ с уставным капиталом 1,2 млн. рублей (на сегодняшний

день этот капитал составлял бы примерно более 25 миллионов гривен).





Малая (полевая) военная радиостанция

Конная радиостанция с боевым расчетом

Среди основных целей этого общества были и исследования в области применения полупроводников.

В начале 1914 г., перед самой войной, Кенигсбергер опубликовал первый в истории обзор по свойствам полупроводников. В нём Кенигсбергер вводит, наконец, понятие "класса полупроводников": "Полупроводниками... будут называться проводники с металлической проводимостью, сопротивление которых очень сильно изменяется с температурой..." Описывая количественно зависимость проводимости от температуры, Кенигсбергер предлагает зависимость:

$\sigma = Ae^{-q/T}$ (2), где
T – проводимость
T – температура
A и q – коэффициенты, характеризирующие образец полупроводника.

Благодаря опубликованным работам Кенигсбергерга, на мощностях РОБТиТа стали выпускаться первые кристаллические детекторы для военных радиостанций.

Кристаллические детекторы производства Р.О.Б.Т. и Т

Начало первой мировой войны отодвинуло задачи исследований полупроводников на второй план. С первых дней войны все заводы радиопромышленности в России работали, чтобы обеспечить качественной связью Россию с союзной Антантой. Это было жизненно необходимо, поскольку проводная связь с союзными странами Россией, Францией и Англией проходила через территории противника. Так указом Николая II, именно общество РОБТиТ должно было построить в кратчайшие сроки несколько стационарных радиостанций для связи с союзниками. Согласно сохранившимся материалам, в течении 3 месяцев 1914 г. были построены 3 радиостанции в Царском селе, в Москве на Ходынке и в Твери.

Создание Тверской приемной радиостанции сыграло ключевую роль в истории полупроводниковой техники. Именно здесь собрался уникальный исследовательский коллектив во главе с профессором В.К. Лебединским и М.А. Бонч-Бруевичем.

Случайная встреча в одном из пригородных (как их называли в то время — дачных) поездов профессора Лебединского с еще никому неизвестным юношей Олегом Лосевым повлияла на судьбу дальнейшего развития полупроводниковой техники. Незаурядные знания в области физики, и явное рвение к радиотехнике молодого Олега Лосева (на то время он учился еще в школе), подтолкнули Лебединского к поддержке юноши в его начинаниях. Так Олег Лосев в свои 15 лет начал изучать азы радиотехники на Тверской радиостанции.

Олег Лосев

В то время никто не мог даже предположить, что этот юноша сможет добиться всемирной славы. Время шло, в стране все изменилось: отрекся от престола царь Николай II, потом было создано Временное Правительство, потом Октябрьская революция, гражданская война и голод. Благодаря интересу Временного правительства к радио, а также усилиям В.К. Лебединского и М.А. Бонч-Бруневича в Нижнем Новгороде в начале 1917 года создается радиолаборатория. По масштабам проводимых исследований и производимой продукции в то время, ее, наверное, можно было бы сравнить с "силиконовой долиной" США. Так в стенах этой Нижегородской радиолаборатории создаются первые мощные радиопередатчики, развивается теория антенн, проводятся уникальные исследования в области радиосвязи. В стенах лаборатории были созданы первые проекты мощных радиостанций для массовой радиофикации страны, как в то время принято было говорить – "для создания "газеты без бумаги и расстояний". В 1920 году, в радиолаборатории появляется Олег Лосев и через некоторое время под руководством В.К. Лебединского начинает проводить исследования кристаллических детекторов.

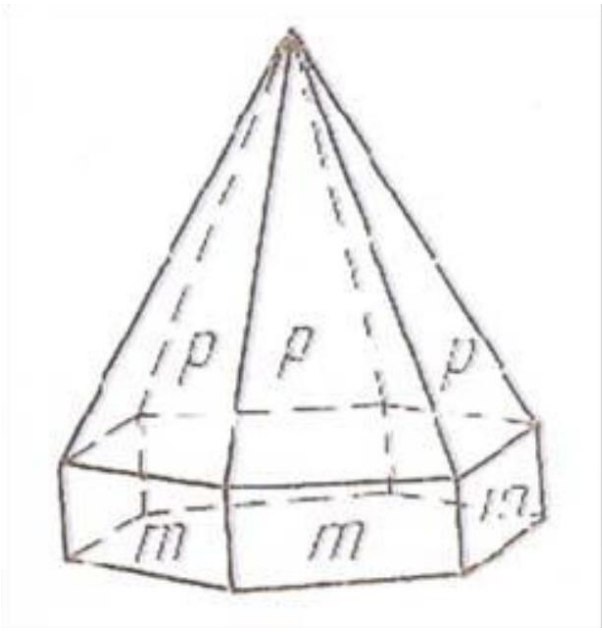
В 1922 году, проводя опыты с кристаллом цинкита – простым окислом цинка (ZnO), он делает крупное открытие, которое получило признание не только в Советском Союзе, но и во всем мире.

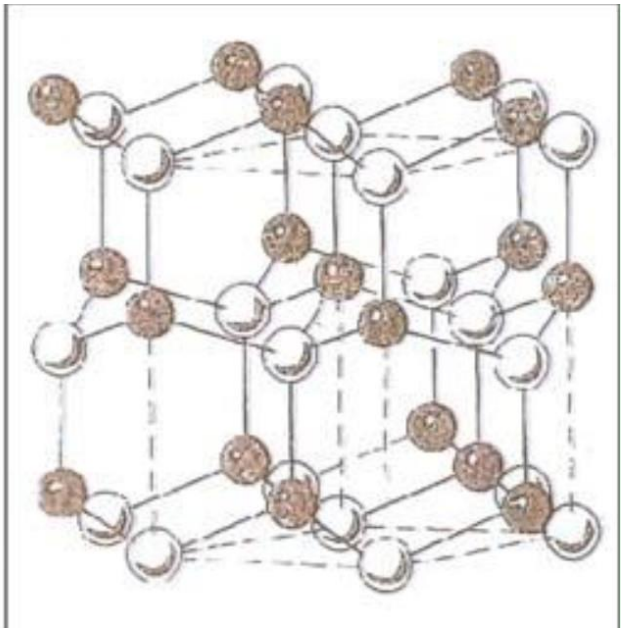
Справка: Цинкит — (красная цинковая руда) редкий минерал класса простых окислов цинка. Открыт в 1845 году австрийским минералогом В. Хайденгером.

Относится к простым оксидам. Название получил по содержанию в нем цинка. Химический состав - Zn - 80,3%, O - 19,7%. Нередко часть цинка замещается марганцем (Mn). Очевидно примеси марганца являются причиной окраски.

Сингония гексагональная, вид симметрии дигексагонально-пирамидальный.

Атомы цинка образуют гексагональную плотную упаковку, в которой каждый атом (ион) кислорода окружен четырьмя ионами Zn по тетраэдру.





Обычно образует сплошные, листоватые и зернистые агрегаты. Кристаллы разные в виде гексагональной призмы, которая наверху заканчивается гексагональной пирамидой, а внизу - моноэдром.

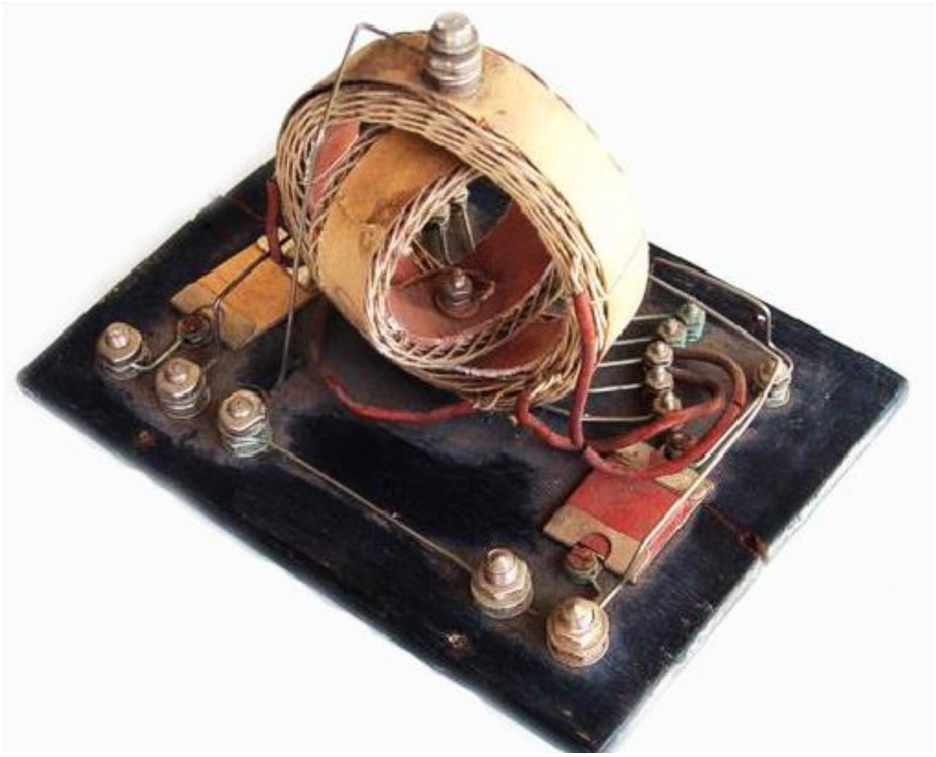
Физические свойства. Чистый ZnO - бесцветный. Из-за примесей цвет темно-красный, ярко-красный, оранжево-желтый. Риска - оранжево-желтая. Блеск близок к алмазному, полуметаллический. Излом раковистый, хрупкий. Удельный вес - 5,68. Твердость 4,0-4,5. Микротвердость - 150-318. Обладает свойствами полупроводника.

Наиболее знаменитые месторождения цинкита - Франклин Фёрнас и Стерлин-Хилл в штате Нью-Джерси (США), где минерал встречается вместе с белым и красным кальцитом. Там найдены очень красивые образцы, весьма ценные с научной точки зрения. Известны находки цинкита в Польше, Испании и Австралии. Когда-то важная цинковая руда, цинкит после истощения американских месторождений превратился в настоящую редкость для коллекционеров камня.

Исследования Лосева показали, что кристаллический детектор может служить одновременно и усилителем, и генератором маломощных незатухающих колебаний. В наибольшей степени этими свойствами обладает детекторная пара: цинкит—уголь и цинкит—сталь. Приемник, в котором используются указанные свойства кристаллического детектора, получил название "кристадин". Преимущество кристадина по сравнению с ламповым детекторным приемником заключалось в простоте его устройства и дешевизне: он потреблял мало энергии, а для его работы достаточно было нескольких элементов сухих электрических батарей.

Конечно, в то время кристадин не являлся серьезным конкурентом для ламп, он был ненадежным и капризным в работе. Но, тем не менее, много радиолюбителей сами собирали кристадин Лосева, поскольку использование последнего давало широкое поле для творчества. К примеру, вот что было написано о кристадине в одном из журналов Радиолюбитель за 1923 год:

"…кристадином только в самое последнее время заинтересовались; несомненно — кристаллический детектор еще не сказал своего последнего слова. Для любителя тут открывается широкое поле для экспериментирования (производства опытов)."



Один из вариантов кристадина Лосева

На страницах этого журнала мы находим электрические схемы различных приборов, с применением в них кристаллического детектора.

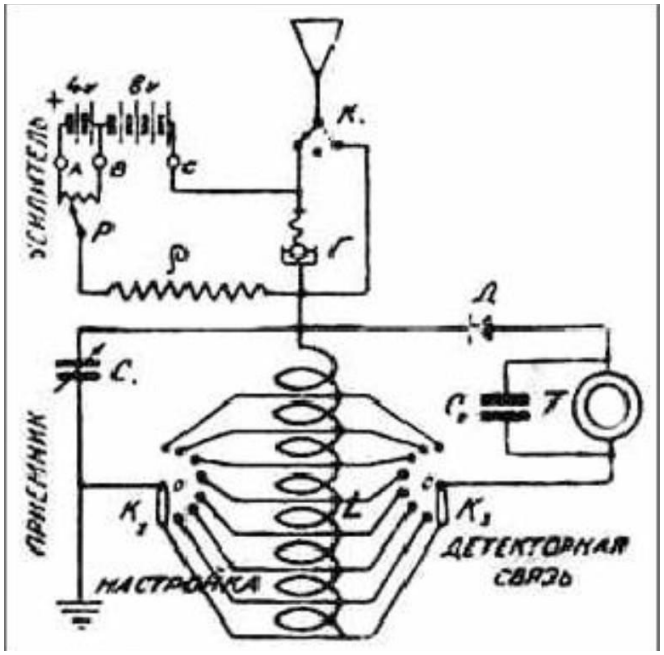
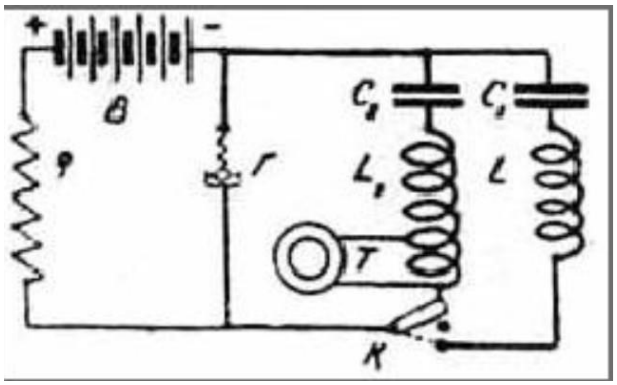
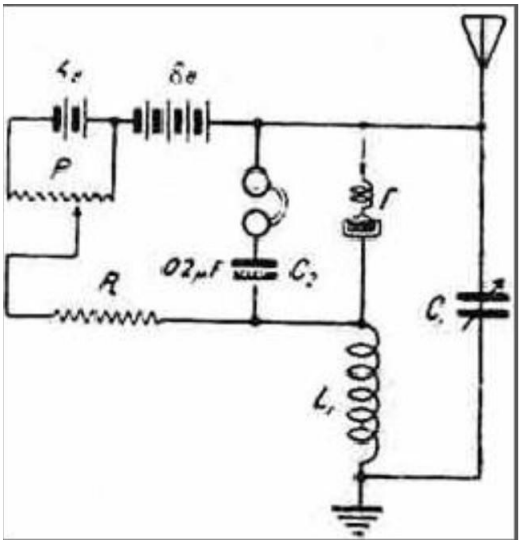


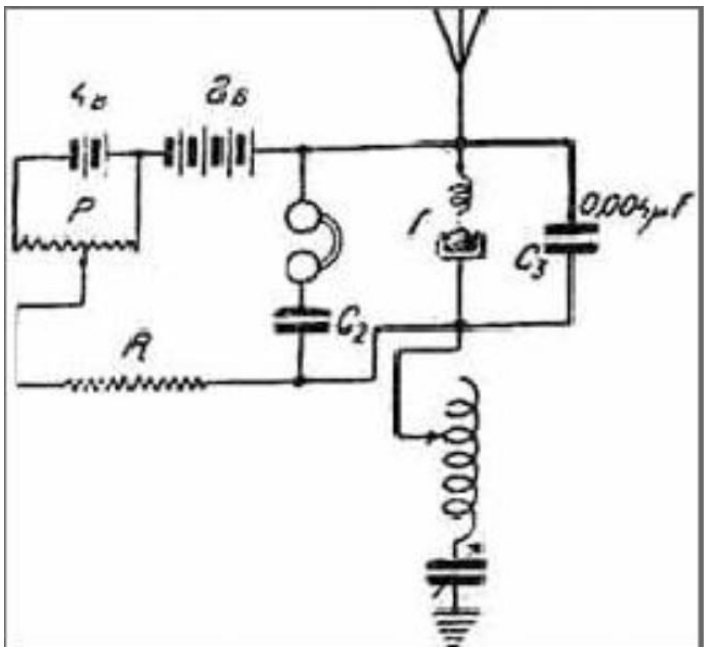
Схема детекторного усилителя высокой частоты



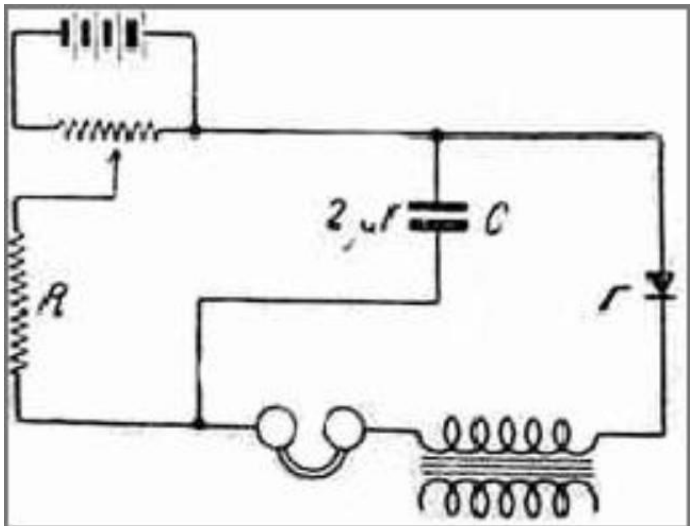
Детекторный генератор высокой и низкой частоты



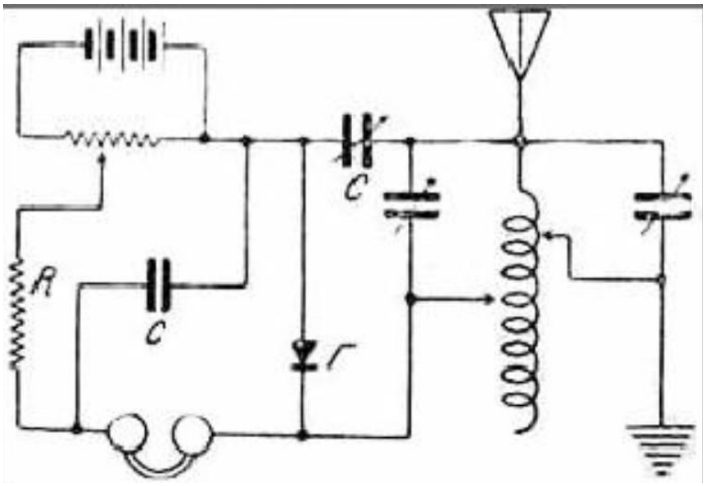
Регенеративный приемник для приема длинных волн



Регенеративный приемник для приема коротких волн



Усилитель низкой частоты



Цинкитный прерыватель

Благодаря простоте схемы и легкости в настройке, кристадин Лосева получает широкое распространение. А статьи автора этого устройства появляются в научно-технической периодике как Советского Союза, так и в иностранных изданиях.

Продолжая свои работы, О. Лосев проводит исследования кристаллических детекторов, построенных на основе различных материалов, так как он рассматривает не только соединение цинкит-сталь, но и другие. В таблице 1 приведены основные его наработки, которые печатались в 1920-х годах прошлого столетия в радиотехнических журналах.

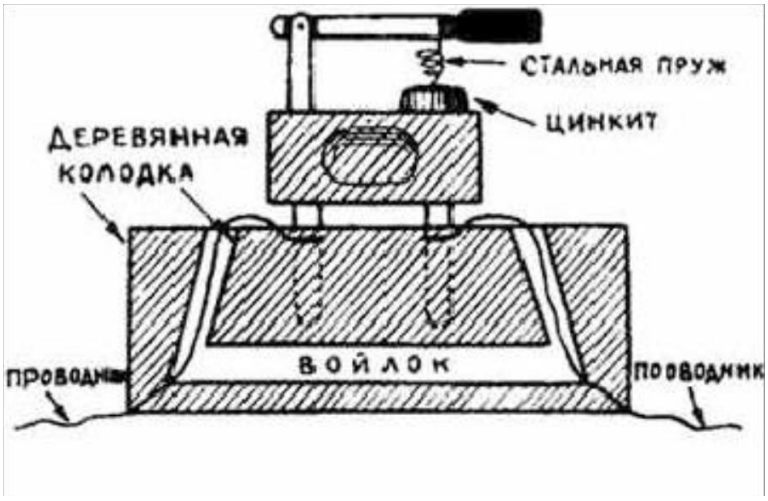
Таблица 1

№ п/п	Кристалл	Знак прил. к кристаллу напряжения	Пара к нему	Знак прилож. Напряжения	Устойчив. и сила колебаний	Примечание
1	Цинкит	+	Уголь	-	10	Колебания сравнительно легко получаются при напряжении в 8-12 вольт
2	Цинкит	-	Уголь	+	7	
3	Цинкит	+	Сталь	-	8-10	
4	Цинкит	-	Сталь	+	5	
5	Цинкит	+	Медь	-	7	
6	Цинкит	+	Цинк	-	4	
7	Цинкит	+	Магний	-	8	Колебан. получ. легко, но неустойчивы
8	Цинкит	+	Вольфрам	-	7	
9	Цинкит	+	Алюминий	-	2	
10	Цинкит	-	Алюминий	+	3	
11	Свинц. блеск	+	Сталь	-	2-3	
12	Свинц. блеск	+	Медь	-	2	Напряж. 25—20 в.; генерация получается не со всеми кристаллами.
13	Свинц. блеск	-	Медь	+	нет	
14	Свинц. блеск	+	Никель	-	2	
15	Пирит	+	Сталь	-	4	
16	Пирит	+	Уголь	-	5	
17	Халькопирит	-	Цинк	+	2	Колеб. получаются только с некотор. сорт. халькопирита
18	Халькопирит	-	Алюминий	+	2	
19	Ферросилиций	+	Уголь	-	1	Колебан. очень неустойч. И получаются лишь с некотор. сортами ферросилиция, напр. 15—20 в.
20	Ферросилиций	+	Графит	-	4	
21	Ферросилиций	+	Сталь	-	1-2	

Также О. Лосев разрабатывает и публикует методики создания кристаллических детекторов в домашних условиях. Одна из методик, описана в журнале Радио Всем №9 за 1924 год: "… Для начинающего можно рекомендовать взять генерирующей парой кристалл — цинкит и пружинку — сталь. Цинкит необходимо выбрать хорошего качества. Лучше всего переплавить цинкит на вольтовой дуге, тогда генерирующие качества его увеличиваются. Однако переплавку не всякий имеет возможность сделать, и можно, конечно, употреблять цинкит без переплавки.

Угольная пластина

Переплавку можно произвести на вольтовой дуге киноаппарата, однако, при минимальном токе. Цинкит кладется на угольную пластинку и засыпается перекисью марганца (для предохранения от распыления при высокой температуре). Между кристаллом и вторым угольным электродом возникает, при соответствующем приближении электродов, вольтова дуга, которая и плавит цинкит. Плавка продолжается до момента, пока цинкит не превратится в овальный королек, на что потребуется 15—20 секунд. За плавкой наблюдают через закопченное или темно-красное стекло.



Конструкция цинкитного детектора

После плавки цинкит очищается от черной корки и раскалывается, кристалл закрепляется в чашечку детектора свежим изломом наружу. Пружинка делается из стали в 0,2 миллиметра толщиной и состоит из 2-х витков (диаметр витка 7—8 мм). Детектор для предохранения от сотрясения лучше всего ставить в особый станочек."

В этот же период юмористы страны советов высмеивают кристаллические детекторы, над которыми радиолюбители "колдовали" в поисках устойчивого сигнала. Такие высмеивания были неслучайны, порой даже радиолюбители со стажем тратили много часов на поиск "стабильно работающей точки". Поэтому часто люди, отдаленные от радиолюбительства говорили, что в кристалле детектора сидит "нечистая сила". Только в начале 30-х годов XX ст. было установлено, что присутствующие в кристаллах нежелательные примеси влияют на "качество" работы детекторов.

Шарж на работу радиолюбителя с кристаллическим детектором

В 1928 году О. Лосев делает еще одно важное открытие, которое легло в основу современных светодиодов. Исследуя кристаллы карборунда (карбид кремния), он открывает электролюминесценцию. Причем не имея ни теоретической базы, ни необходимого технического оборудования О. Лосев утверждает, что природа двух его открытий (генерация колебаний и свечение) изначально имеет единую физическую основу.

Справка: Карборунд, карбид кремния — бинарное неорганическое химическое соединение кремния с углеродом. Химическая формула SiC. В природе встречается в виде чрезвычайно редкого минерала — муссанита. В большинстве случаев этот минерал в природе встречается как включения в метеоритах. Впервые был обнаружен в 1905 году

при изучении состава метеорита из Каньона Диабло в Аризоне Анри Муассоном.

В 1932-1933 гг. уже в Ленинграде О. Лосев подробно исследовал фоторезистивный эффект, присущий многим полупроводниковым материалам. Им, в частности, была показана высокая фоточувствительность фоторезисторов на основе PbS (сульфид свинца, свинцовый блеск). В конце 1930-х годов высокочувствительные фоторезисторы на основе PbS были разработаны и в Германии; они находили большое применение во время Второй мировой войны. Фоторезисторы на основе PbS до сих пор являются одними из самых широко применяемых фоторезисторов инфракрасного (ИК)-диапазона, особенно в головках самонаведения и в космических системах раннего обнаружения запусков ракет.

Становление физики полупроводников

В 1926 г. австрийский физик, лауреат Нобелевской премии Эрвин Шредингер разработал теорию движения микрочастиц, так называемую волновую механику. С её помощью началось формирование представления об электронных "ансамблях", зонной теории валентности и т.п. Одна из первых удовлетворительных теорий полупроводников была построена членом Лондонского королевского общества Аланом Х. Вильсоном. Он предложил "зонную теорию", по которой энергетические состояния электронов в твердом теле создавали непрерывные зоны. Сложившееся в эти годы представление о структуре твердого тела привело к введению понятия "дырки". Эти "дырки" вели себя подобно возбужденным электронам, характеризовались подвижностью и плотностью тока. Термин "дырочная проводимость" впоследствии впервые ввёл советский физик член-корреспондент АН СССР Я.И. Френкель.

К началу 30-х годов XX ст. немецким физиком Вальтером Шоттки экспериментально было установлено два типа полупроводников – "избыточные" и "дефектные". К "избыточным" он относил полупроводники, которые имели отрицательное значение эффекта Холла. Ныне их определяют как полупроводники n-типа (от слова negative). "Дефектными" назывались образцы, имеющие положительное значение эффекта Холла, p-тип (от слова positive).

Важную роль в развитии теории полупроводников в начале 30-х годов XX ст. сыграли работы, проводимые в СССР под руководством академика Абрама Федоровича Иоффе. В 1931 г. он опубликовал статью с пророческим названием: "Полупроводники – новые материалы электроники".

В начале 30-х годов XX ст., правительство развитых стран делали упор на создание и развитие радиолокации. Основной задачей, которая ставилась перед учеными, была разработка технологии дальнего обнаружения летящих бомбардировщиков противника. К середине 30-х годов XX ст. были разработаны первые радиолокационные станции. В это время физика полупроводников выделилась в отдельную науку, а интерес к

полупроводниковым детекторам был особо высок. Это было обусловлено двумя причинами:

Во-первых, полупроводниковые детекторы (диоды) привлекали к себе внимание физиков, которые интересовались процессами, происходящими на границе контакта металл- полупроводник в детекторе.

Во-вторых, не смотря на то, что в радиотехнике господствовали электровакуумные приборы, кристаллический детектор продолжали применять на ультравысоких частотах, где он оказался наиболее эффективным.

Так, к примеру, 3 января 1934 года на Васильевском острове в Санкт-Петербурге, были успешно проведены испытания первой экспериментальной установки по приему отраженных от самолета радиоволн. В ней были применены кристаллические детекторы, которые подтвердили практическую возможность реализации идей по радиолокации.

К середине 30-х годов XX ст. основной задачей для физиков, работающих с полупроводниковой техникой, была задача объяснить физическую природу явлений на контакте металл-полупроводник. Ни одна из теорий тех лет ее не объясняла. Ученым уже удалось экспериментально получить слиток кремния, у которого с одной стороны была проводимость p-типа, а с другой n-типа. Историей стало событие, когда сотрудник компании "Bell Labs" Рассел Ол, вырезал из этого слитка образец, содержащий в себе p-n переход. Это было в 1935 году, который вероятнее всего и необходимо считать годом создания p-n перехода, который в настоящее время является основой диодов и транзисторов, а также интегральных микросхем и микропроцессоров.

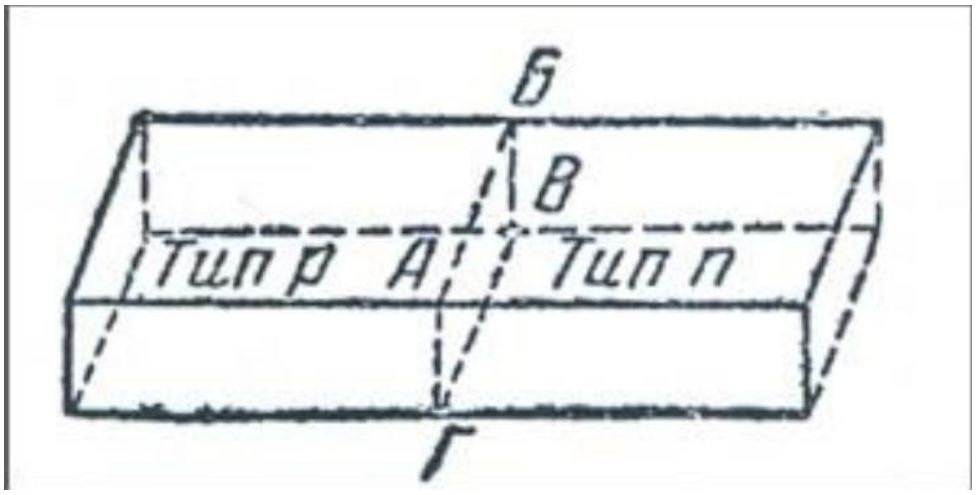
В Советском Союзе в начале 30-х годов XX ст. проводился целый комплекс теоретических и экспериментальных исследований процессов в контактах металл-полупроводник, а также контактах полупроводников с разным типом проводимости, которые мы сейчас называем p-n переходами. Именно в это время начали зарождаться основы теории выпрямления тока на p-n переходе.

Справка. В 1937 г. акад. А.Ф. Иоффе и А.В. Иоффе обратили внимание на возможность выпрямления в контактном слое, образованном двумя полупроводниками с проводимостью разного типа. Теория выпрямления в таком слое без учета контактной разности потенциалов была тогда же разработана Б.И. Давыдовым и впоследствии А.И. Губановым.

Граница соприкосновения двух полупроводников с проводимостями различного типа характеризуется тем, что в тонком пограничном слое между ними имеет место переход проводимости одного типа в проводимость другого типа. В связи с этим области соприкосновения электронных и дырочных полупроводников получили название электронно-дырочных переходов проводимости или — короче — переходов типа n—p или p—n.

Наиболее последовательная теория выпрямления тока на контакте разных полупроводников была разработана сотрудником ФТИ АН СССР Борисом Иосифовичем Давыдовым в 1938 г. Он предложил собственную теорию прохождение тока в диодных структурах полупроводников, в том числе с разным типом проводимости, названных позднее p-n переходами.

Им были опубликованы материалы, согласно которым предполагалось существование запирающего слоя в специально выращенном монокристалле германия, объем которого разграничен поверхностью, разделяющей германий типа p и германий типа n (рис). Разделяющая поверхность АБВГ является в этом случае поверхностью перехода типа p-n. Образование запирающего слоя в переходе типа p-n для германия полностью укладывалось в теорию образования запирающего слоя в контакте между двумя раздельными полупроводниками с проводимостью разного типа.



Выращенный монокристалл германия, в котором поверхность АБВГ является границей между германием типа p и германием типа n

Эксперименты показали, что при таких условиях образования запирающего слоя пограничная площадь между германием типа p и германием типа n может иметь значительную площадь и ограничивается только величиной выращенного монокристалла. При этом было обнаружено, что переход типа p-n между двумя различными объемами германия типа p и типа n в этом случае характеризуется большей однородностью и устойчивостью, чем при естественном образовании на поверхности полупроводника тонкого слоя с проводимостью другого типа в случае контакта тонкого острия металлической пружинки.

Было предсказано, что контакт между двумя полупроводниками с различными типами проводимости должен характеризоваться вольтамперной характеристикой нелинейного типа, присущей кристаллическому диоду и что такой контакт может служить для выпрямления или преобразования тока.

Справка. В нормальном кристаллическом диоде осуществляется контакт между металлической, чаще всего — вольфрамовой, контактной пружинкой и полупроводником типа n или типа p. Таким образом, описанный механизм образования запирающего слоя в

контакте между полупроводниками типа n и типа p, казалось бы, не имеет непосредственного отношения к кристаллическому диоду, но проведенные исследования процессов в контактном слое полупроводниковых выпрямителей, впервые проведенные советскими физиками, показали, что это не так. **В 1940 г. проф. В.Е. Лашкарев показал, что в меднозакисных и селеновых выпрямителях запирающий слой расположен не на самой поверхности полупроводника, а в его объеме на небольшой глубине от поверхности, причем поверхностный слой полупроводника выпрямителя характеризуется проводимостью другого типа, чем весь остальной его объем, находящийся по другую сторону от запирающего слоя.**

Запирающий слой находится не на поверхности полупроводника, а в его объеме на небольшой глубине от поверхности и существует в полупроводнике независимо от его контакта с металлом. Такое представление о запирающем слое дало возможность объяснить тот факт, что в кремниевых и германиевых кристаллических диодах эффект выпрямления, не зависит от природы металла контактной пружинки. Между тем, если бы он определялся в основном контактной разностью потенциалов, то эффект выпрямления должен был бы весьма заметно зависеть от природы металла контактной пружинки. Так же было экспериментально доказана возможность выпрямления в контакте между двумя полупроводниками с электронной и дырочной проводимостью.

Таким образом, можно полагать, что запирающий слой, образующийся в объеме германия и кремния вблизи от поверхности на границе раздела полупроводников с электронной и дырочной проводимостью, является доминирующим фактором с точки зрения выпрямления в германиевых и кремниевых диодах. Это не исключает того, что в некоторых типах полупроводниковых выпрямителей доминирующим может являться запирающий слой, образующийся вследствие контактной разности потенциалов на границе металл-полупроводник. В некоторых случаях может иметь место совместное действие обоих запирающих слоев.

Борис Давыдов

В соответствии с результатами исследовательских работ было принято, что выпрямление в таких диодах происходит за счет запирающего слоя, находящегося в объеме германия или кремния на очень небольшой глубине от поверхности. Этот слой существует независимо от того, имеется ли контакт между металлической пружинкой и поверхностью германия или кремния. Запирающий слой образуется вследствие того, что в результате обработки поверхности германия и кремния в процессе их изготовления на этих полупроводниках в естественных условиях образуется тончайший поверхностный слой с проводимостью другого типа, чем проводимость объема этих полупроводников.

В предложенной Б.И. Давыдовым теории впервые было дано теоретическое обоснование p-n перехода и введено понятие инжекции.

Справка: Инжекция — физическое явление, наблюдаемое в полупроводниках, при котором при пропускании электрического тока в прямом направлении через p-n-переход в прилежащих к переходу областях создаются высокие концентрации неравновесных ("инжектированных") носителей заряда.

Величины обратных токов, рассчитанные по теории Б.И. Давыдова, были на много порядков меньше, наблюдаемых в существовавших в то время выпрямителях на основе закиси меди и селена. Как показали последующие исследования, на протекание тока в существовавших тогда полупроводниковых выпрямителях явление инжекции не оказывало заметного влияния. Оно определяется процессами в слое объемного заряда p-n- перехода. К сожалению, сведения об исследованиях Б.И. Давыдова на сегодняшний день отсутствуют в справочниках о советских физиках. Этот удивительный факт — результат не только случайной ошибки в его личном деле, где были перепутаны инициалы. Время, когда он трудился на благо науки, наложило трагический отпечаток на его карьеру физика-теоретика. В 1952 году он был уволен из Курчатовского института как "неблагонадежный" гражданин, но все же смог продолжать свою работу в Институте физики Земли, где он занимался исследованием.

В 1941 году В.Е. Лашкарев и К.М. Косаногов, которые, так же как и Давыдов принадлежали к Ленинградской школе физиков, доказали, что выпрямление в детекторах на основе структуры окисел меди — закись меди определяется гетероконтактом полупроводников p- и n-типов проводимости. Модель для объяснения природы физики этого процесса предлагались Д.Н. Наследовым и Г.Б. Абдуллаевым, но, несмотря на многочисленные исследования, теория полупроводниковых выпрямителей на основе закиси меди и селена в течение многих лет не была создана.

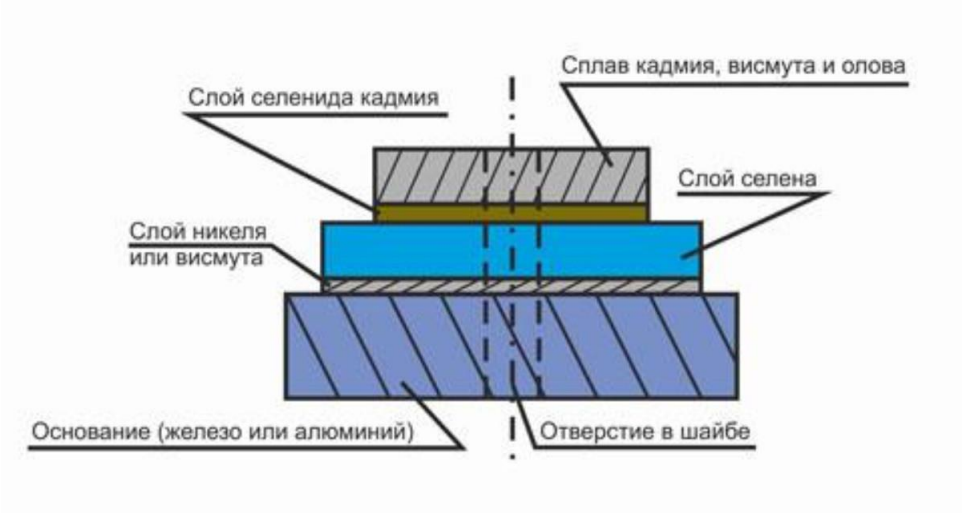
Справка. Когда ученые смогли понять детектирующие (выпрямляющие) свойства p-n переходов, промышленностью стали выпускаться различные вентильные устройства.

До появления плоскостных кремниевых и германиевых диодов массово производились селеновые диоды, набранные в столбики или же в плоские конструкции, которые радиолюбители называли "шоколадками" (рис).

Селеновый выпрямитель плоской конструкции (шоколадка)

Селеновые столбики (Музей ООО "ЕПОС")

Благодаря простоте устройства, надежности их действия селеновые выпрямители очень быстро вытеснили все другие виды выпрямителей. Селеновый выпрямитель состоит из набора отдельных селеновых шайб, каждая из которых является элементарным самостоятельным выпрямителем (диодом). Селеновая шайба имеет свойство вентиля (диода), то есть хорошо проводит ток в одном направлении (от железного основания к контактному сплаву) и очень плохо – в обратном направлении (см.рис.).



Конструкция селеновой шайбы (диода)

Селеновая шайба состоит из алюминиевой или железной пластины круглой или квадратной формы, покрытой с одной стороны слоем кристаллического селена, который является электродом с дырочной (p-тип) проводимостью. Для создания второго электрода на поверхность селена наносится сплав из олова, кадмия и висмута. При диффузии кадмия в селен образуется тонкий слой селенида-кадмия, имеющий электронную (n-тип) проводимость. На границе между селеном и селенидом-кадмия образуется p-n переход.

Вентильные качества селеновой шайбы как и всякого вентиля определяются величиной его сопротивления в проводящем (прямом) и не проводящем (обратном направлении).

Соединяя параллельно или последовательно такие шайбы, можно собрать селеновый выпрямитель для тока или напряжения любой величины:

1. Токовая нагрузка селеновой выпрямительной шайбы определяется ее площадью. Максимально допустимая плотность тока в прямом направлении не должна превышать величины 100-200 мА/см^2. Для выпрямления больших токов применяется параллельное соединение пластин.

2. Допустимое обратное напряжение на селеновой шайбе составляет величину 20-40 В, поэтому для применения селеновых выпрямителей при более высоких напряжениях селеновые шайбы соединяют последовательно в столбы.

К недостаткам селеновых выпрямителей относятся:

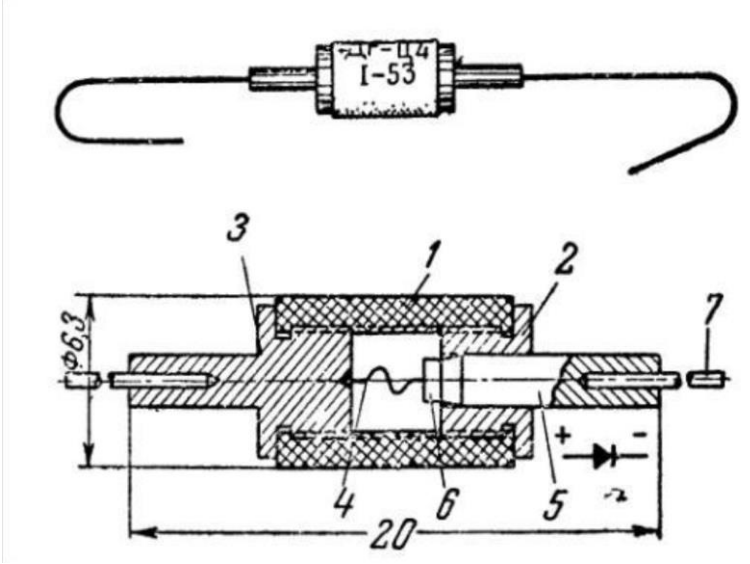
1. Высокая емкость, поэтому они применяются только в низкочастотных устройствах.

2. Низкая рабочая температура, не выше +75-125 °С (при более высокой температуре расплавляется контактный сплав кадмия с висмутом и оловом).

К середине 40-х годов XX столетия, проведенные теоретические исследования показали необходимость и возможность создание новых полупроводниковых приборов. Причиной этому послужил все тот же интерес военных к применению полупроводников в радиолокации. В СССР для развертывания работ по радиолокации были созданы специализированные научно-исследовательские и конструкторские бюро: ЦНИИ-108, НИИ-160, КБ-1 и др. Эти работы были "закрытыми", поэтому даже сейчас нет полной информации о тех работах, которые проводились в этих лабораториях.

До 1944 года в СССР для радиолокации использовались СВЧ-детекторы по схеме О. Лосева. Применение таких детекторов, как в полевых, так и в стационарных условиях было весьма непростой задачей. Обслуживающему персоналу радиолокационной станции приходилось тратить много времени для поиска "стабильной точки" на поверхности кристалла.

Учитывая большую важность диапазона СВЧ радиоволн для радиолокации, в ЦНИИ-108 была поставлена задача — разработать более надежное точечно-контактное соединение в детекторе СВЧ. Данное исследование в архивах значится как НИР "Контакт". За его основу был принят вариант сварного (вварного) точечного контакта металла с кристаллом германия. На рисунке представлена конструкция германиевого диода, выполненного как точная копия детектора О. Лосева, только уменьшенная в несколько десятков раз. Диод представлял собой конструкцию, в которой тонкая вольфрамовая пружинка своим острием опиралась на монокристалл германия. Пружинка и кристалл крепились к металлическим фланцам, в которые запрессовывались гибкие контакты. Конструкция от влаги и повреждений защищалась керамической втулкой (см. рисунок).



Внешний вид конструкции отечественного германиевого диода типа ДГ-Ц 4.
1-керамическая втулка; 2 и 3 - металлические флянцы; 4 - вольфрамовая пружинка; 5 - кристаллодержатель; 6 - германий; 7 - выводы

Для производства детекторов этого типа в большом количестве потребовались монокристаллы германия, собственное производство которых в то время в СССР отсутствовало.

Справка: Кристаллические диоды, в которых контакт малой площади между полупроводником и металлом осуществляется с помощью острия тонкой металлической пружинки получили название – кристаллический диод с точечным контактом.

Функционирование некоторых полупроводниковых выпрямителей (купороксных и селеновых), разработанных ранее было возможно при различных площадях контакта от сколь угодно малых до больших. Площадь контакта в таких выпрямителях определяет собой лишь предельно допустимую величину протекающего тока, а также емкость, которая шунтирует запирающий слой.

Величина площади контакта в германиевых и кремниевых диодах имеет для практики их применения очень большое значение:

Малая площадь контакта в кремниевых и германиевых диодах является их несомненным достоинством для применения в технике СВЧ, так как они характеризуются малой емкостью, которая шунтирует запирающий слой. Эта емкость в германиевых и кремниевых диодах имеет величину порядка 1 пф, благодаря чему их и удается применять в качестве смесителей и детекторов на сантиметровых волнах.

Кристаллические диоды типа германиевых и кремниевых, в которых контакт малой площади между полупроводником и металлом осуществляется с помощью острия тонкой металлической пружинки, носят название кристаллических диодов с точечным контактом. Следует подчеркнуть, что точечный контакт является необходимым для существования запирающего слоя в таких диодах. Известно, что при увеличении площади контакта между германием (или кремнием) и металлической поверхностью выпрямляющие свойства такого кристаллического диода пропадают, так как пропадает запирающий слой. Это обстоятельство используется, в частности, при осуществлении контакта между полупроводником и металлическим основанием патрона, в котором смонтирован германиевый или кремниевый диод. Задача этого контакта состоит в том, чтобы создать полную электрическую проводимость между выводом патрона и объемом полупроводника. Образование запирающего слоя в этом контакте служило бы помехой при использовании кристаллического диода. Контакт без запирающего слоя между поверхностью кремния (или германия) и металлическим основанием патрона осуществляется благодаря тому, что поверхность контакта здесь выбирается большой.

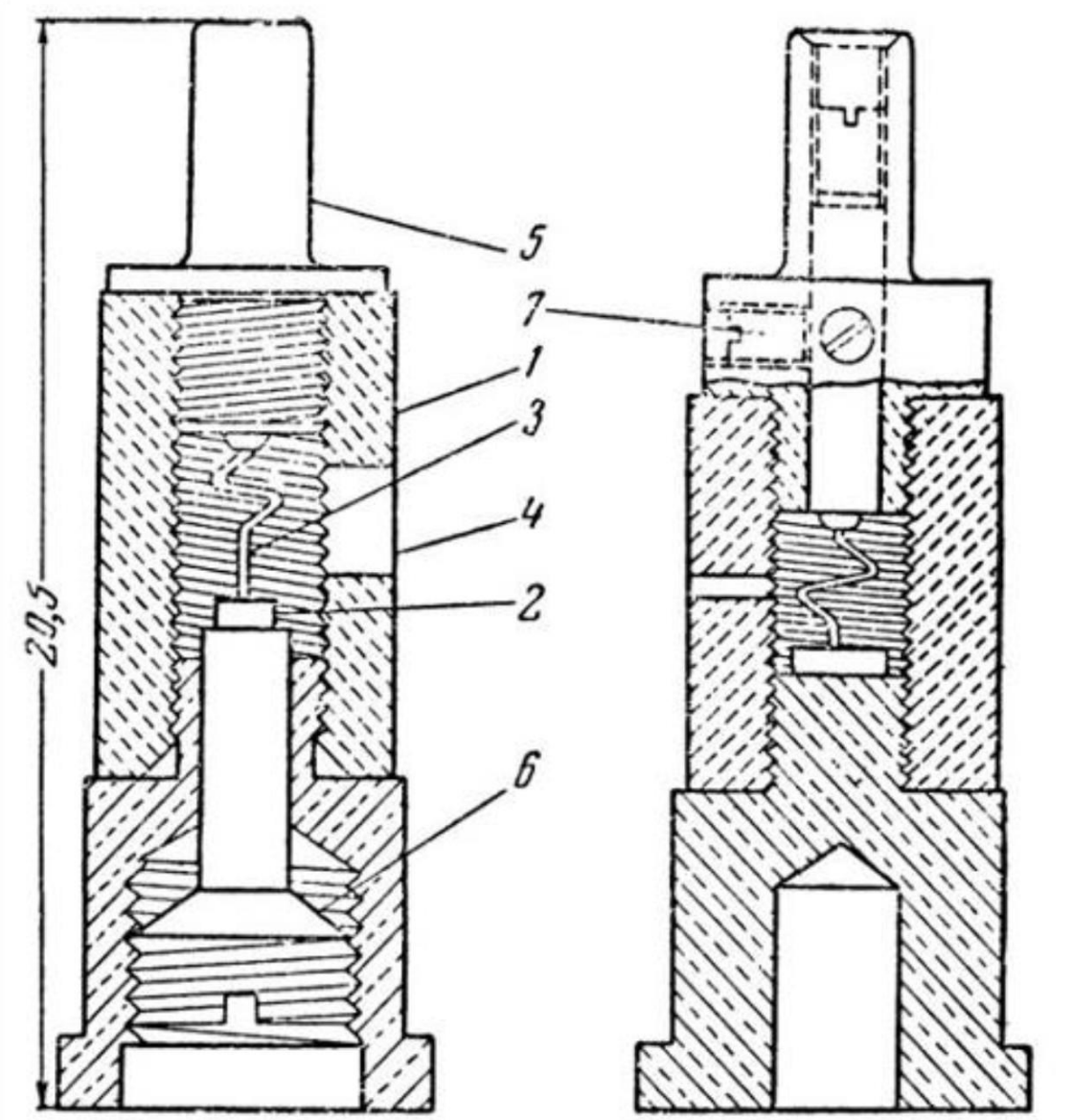
Таким образом, запирающий слой проявляется в контакте между кремнием (или германием) и металлом лишь в случае контакта малой площади, т.е. точечного контакта. Нормальная площадь контакта в кристаллическом диоде с точечным контактом имеет порядок 10-6 $см^2$.

Контактная пружинка в кристаллических диодах с точечными контактами делается из тонкой вольфрамовой проволоки диаметром около 0,1 мм, заостренной на конце. Вольфрам применяется для контактных пружинок вследствие его твердости и упругости.

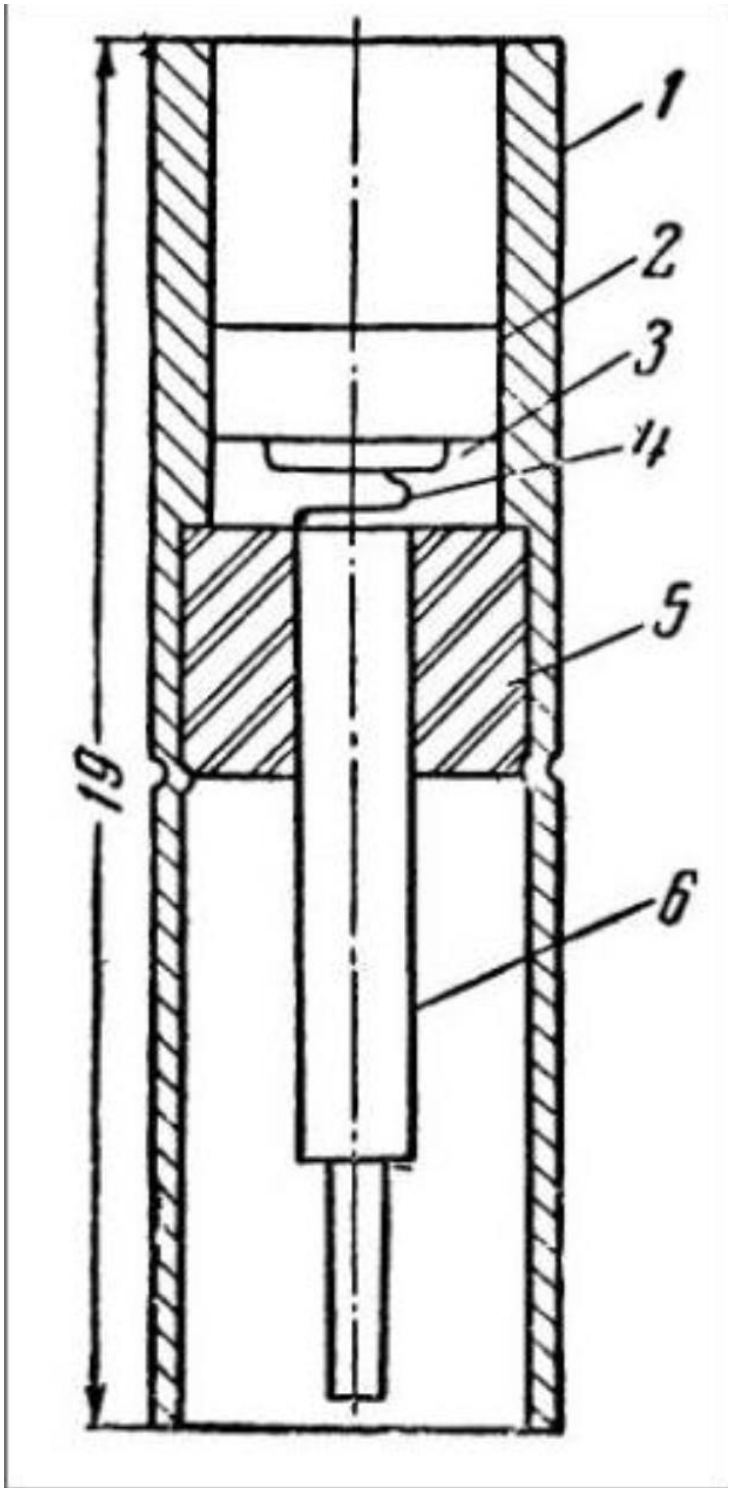
Причина пропадания нелинейных свойств контакта металла с полупроводником при увеличении площади контакта связана с неоднородным состоянием образующегося в естественных условиях поверхностного слоя германия или кремния. Поверхностный слой, который, как уже указывалось, характеризуется проводимостью другого типа, чем для основного объема германия, имеет "пятнистую" структуру. Это означает, что в поверхностном слое германия примеси, образующие примесную проводимость этого слоя, распределены неравномерно. Имеются небольшие области, где примеси присутствуют. В таких областях проводимость поверхностного слоя имеет другой тип, чем проводимость объема германия, вследствие чего в них образуется запирающий слой. Но рядом с такой

небольшой областью (небольшим "пятном") может оказаться область, где примесных атомов нет. В этой области отсутствует поверхностный слой с проводимостью другого типа, проводимость основного объема германия, и, следовательно, не образуется запирающего слоя. Контакт металла с проводником в этой области будет поэтому линейным. Сопротивление его будет определяться только сопротивлением объема полупроводника. Если площадь контакта достаточно велика, то контакт металла с полупроводником будет осуществляться не только через области "пятен", где есть примесные атомы, но также и через те области, где примесных атомов нет. Так как сопротивление контакта в этих областях мало, то они будут оказывать шунтирующее действие на те области контакта, где есть запирающий слой. Таким образом, при большой площади контакта в ней окажутся участки поверхности, в которых примесных центров очень мало или вовсе нет. Эти участки и будут нарушать действие запирающего слоя в соседних участках контакта. Вследствие этого при большой площади будут нарушаться и нелинейные свойства контакта.

Поэтому в кратчайшие сроки были разработаны технологии очистки и выращивания германия с необходимыми электрофизическими свойствами. Именно на этих образцах были разработаны новые типы СВЧ детекторов с вварным контактом. Конструкция отечественных германиевых диодов диапазона СВЧ приведена на рисунке.



Конструкция керамических патронов 1-керамическая оболочка; 2-кремний; 3-вольфрамовая контактная пружинка; 4-отверстие в керамике для заполнения полости воском; 5-конец штырька; 6-головка винта;
7-два установочных винта закрепления пружинок в нужном положении.



Конструкция коаксиального патрона 1-внешний проводник; 2-штифт; 3-кремний; 4-контактная пружина; 5-изоляционная шайба; 6-внутренний проводник.

Позднее директор ЦНИИ-108 Аксель Иванович Берг добился возможности организовать производство монокристаллов германия в Гиредмете (Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности). Подключение Гиредмета к проблеме получения германия сыграло важную роль в дальнейшем развитии всей полупроводниковой электроники.

Аксель Берг

В Гиредмете разработка технологии получения германия проводилась начиная с 1946 года под руководством Николая Павловича Сажына. Поставка монокристаллов германия хорошего качества, но небольшого диаметра были налажены только в 1953 году.

Николай Павлович Сажын

В 1949 году на фирме Bell Telephone Labs были разработаны и предложены первые плоскостные диоды на основе германия с p-n переходом. В этом же году была опубликована работа В. Шокли "Теория плоскостных p-n переходов". Полученные экспериментально токи характеристики p-n

переходов оказались близкими к расчетным по теории предложенной Б.И. Давыдовым. В СССР первая статья по германиевым p-n переходам была направлена в журнал "Вестник информации" А. Красиловым в сентябре 1949 года.

4 сентября 1952 года было подписано Постановление Совета Министров СССР о проведении НИР "Разработка германиевых диодов заменяющих маломощные лампы" (шифр "Плоскость") со сроком окончания в третьем квартале 1953 года. Проведение НИР поручалось: ФТИ АН СССР, ЦНИИ-108 и НИИ-160. Предприятие Гиредмет было привлечено для разработки технологии получения германия. В мае 1953 года в ФТИ АН СССР Ж.И. Алферовым были созданы первые плоскостные германиевые диоды. НИР "Плоскость" была принята Государственной комиссией СССР в октябре 1953 года. Разработанные диоды имели параметры, соответствующие утвержденному техническому заданию, а наилучшие конструкционные решения были достигнуты в ЦНИИ-108 и ФТИ АН СССР.

В 1954 году в Физико-техническом институте были созданы германиевые диоды с диаметром p-n перехода до 3 см. Также в этом году были созданы конструкции выпрямителей с водяным охлаждением и рабочими токами до 200 А.

В марте 1958 года постановлением правительства СССР для первой атомной подлодки, начались работы над германиевыми выпрямителями на токи в каждом диоде до 1000 А.

Позднее, разработанные технологии и конструкции новых типов диодов были внедрены на заводе "Электровыпрямитель" (г. Саранск), на котором было организованно их изготовление. Благодаря героическим усилиям ученых СССР, к началу 1960 года завод "Электровыпрямитель" стал флагманом производства полупроводниковых диодов, а проводимые теоретические и экспериментальные работы ученых СССР долгое время позволяли продукции этого завода быть конкурентоспособной на мировом рынке.

Таким образом, к началу 1960-х годов полупроводниковые диоды постепенно вытесняли электровакуумные диоды. Полупроводниковые диоды массово начали применять в радиоприемниках, видеодетекторах, СВЧ-технике и силовой электронике.

Заключение

Несмотря на многолетние исследования полупроводников, которые возникли благодаря "лабораторной случайности", полупроводники по праву стали называть "вторым золотом" в мире. Благодаря применению этих новых материалов удалось добиться впечатляющего и непрерывно развивающегося прогресса в вычислительной технике и в компьютеризации. А это в свою очередь открыло новые направления развития не только техники, но и технологического прогресса человечества.