

ГЛАВА V

ТОК В МЕТАЛЛАХ

§ 29. Сведения об электропроводности. Термометры сопротивления, болометры, тензометры

Из всех металлов наибольшую удельную электропроводность имеет серебро. Электропроводность меди только на 10% меньше электропроводности серебра, притом медь во много раз дешевле, поэтому применяемые в электротехнике высококачественные проводники — жилы проводов и кабелей — чаще всего изготавлиются из меди, очищенной от всех примесей. Сопротивление 1 м медной проволоки при сечении в 1 мм² (т. е. диаметром около 1,13 мм) составляет 0,0175 ома. Медная проволока сечением в 1 мм² имеет сопротивление в 1 ом при длине 57 м. Заметим, что вес такого провода составляет 1 кг при длине провода 110 м.

Медные провода часто заключены в резиновую изоляцию. В этих случаях поверхность медного провода покрывают полудой для предотвращения химического взаимодействия меди с резиной.

Наряду с медью для изготовления телеграфных проводов и проводов линий высокого напряжения широко применяют железо. Для предохранения от ржавчины железо оцинковывают. Железо обладает большой механической прочностью; оно значительно дешевле меди, но его удельное сопротивление примерно в шесть раз больше, чем у меди.

Для изготовления проводов применяют также алюминий, удельное сопротивление которого только в полтора раза превышает сопротивление меди.

Удельные сопротивления и удельные проводимости некоторых металлов, сплавов и углей указаны в таблице на стр. 131.

Сопротивление химически чистых металлов с повышением температуры возрастает, увеличиваясь с каждым градусом примерно на четыре тысячных сопротивления при 0°С.

Для многих химически чистых металлов даже при значительном нагревании сохраняется пропорциональность между увеличением сопротивления и приростом температуры что позволяет вычислить сопротивление при температуре $t^{\circ}\text{C}$ по формуле

$$R = R_0 (1 + \alpha t),$$

**Электрическое сопротивление и электропроводность металлов,
сплавов и углей (при температуре 18° С)**

	Удельное сопротив- ление ¹⁾ в ом·см	Удельная проводи- мость ²⁾ в ом ⁻¹ ·см ⁻¹
Чистые металлы		
Серебро	0,0158 · 10 ⁻⁴	63,3 · 10 ⁴
Медь	0,0175 · 10 ⁻⁴	57 · 10 ⁴
Золото	0,022 · 10 ⁻⁴	45,4 · 10 ⁴
Алюминий	0,027 · 10 ⁻⁴	37 · 10 ⁴
Вольфрам	0,053 · 10 ⁻⁴	18,8 · 10 ⁴
Цинк	0,06 · 10 ⁻⁴	17 · 10 ⁴
Никель	0,073 · 10 ⁻⁴	13,7 · 10 ⁴
Железо	0,1 · 10 ⁻⁴	10 · 10 ⁴
Платина	0,108 · 10 ⁻⁴	9,3 · 10 ⁴
Олово	0,113 · 10 ⁻⁴	8,8 · 10 ⁴
Свинец	0,208 · 10 ⁻⁴	4,8 · 10 ⁴
Сурьма	0,34 · 10 ⁻⁴	2,5 · 10 ⁴
Ртуть	0,954 · 10 ⁻⁴	1,05 · 10 ⁴
Висмут	1,18 · 10 ⁻⁴	0,84 · 10 ⁴
Сплавы		
Латунь (66% меди и 34% цинка)	0,063 · 10 ⁻⁴	15,8 · 10 ⁴
Нейзильбер (65% меди 20% цинка и 15% никеля)	0,31 · 10 ⁻⁴	3,2 · 10 ⁴
Манганин (85% меди, 12% марганца и 3% никеля)	0,39 · 10 ⁻⁴	2,6 · 10 ⁴
Никелин (54% меди, 20% цинка и 26% никеля)	0,42 · 10 ⁻⁴	2,4 · 10 ⁴
Реотан (84% меди, 12% марганца и 4% цинка)	0,45 · 10 ⁻⁴	2,2 · 10 ⁴
Константан (58,8% меди, 40% никеля и 1,2% марганца)	0,47 · 10 ⁻⁴	2,1 · 10 ⁴
Нихром (67,5% никеля, 15% хрома, 16% железа и 1,5% марганца)	1,05 · 10 ⁻⁴	0,95 · 10 ⁴
Угли		
«Металлизированные» угольные нити ламп накаливания (прессованные и сплавленные порошки)	3 · 10 ⁻⁴	0,33 · 10 ⁴
Обыкновенные угольные нити ламп накаливания и угли дуговых фонарей	40 · 10 ⁻⁴	0,02 · 10 ⁴

¹⁾ Если отбросить множитель 10⁻⁴, то эти числа дают (в омах) сопротивление проволоки длиной 1 м с поперечным сечением в 1 мм².

²⁾ Если отбросить множитель 10⁴, то числовые данные представляют собой длину (в метрах) проволоки, которая имеет сопротивление в 1 ом при поперечном сечении в 1 мм².

где R_0 — сопротивление при 0°C и α — температурный коэффициент сопротивления.

Для некоторых металлов $\alpha \approx 0,0367 = 1/273$. Следовательно, в этих случаях сопротивление примерно пропорционально абсолютной температуре:

$$R \approx R_0 \frac{T}{T_0}.$$

Это означает, что при нагревании от 0 до 135°C сопротивление металла возрастает примерно в полтора раза, а при таком же охлаждении оно убывает примерно в два раза.

Температурные коэффициенты некоторых металлов и сплавов в области комнатных температур приведены в таблице.

Температурные коэффициенты некоторых металлов и сплавов

Металл	Температурный коэффициент	Сплав	Температурный коэффициент
Серебро	0,0037	Латунь	0,0015
Алюминий	0,0038	Нихром	0,0002
Цинк	0,0039	Никелин	0,00002
Медь	0,004	Манганин	0,000008
Свинец	0,0041	Константан	0,000004
Железо	0,006		

Эта таблица показывает, что константан и манганин отличаются исключительным постоянством удельного сопротивления. При уменьшении абсолютной температуры в пять раз (от 0°C , т. е. 273°K , до 56°K) сопротивление манганина уменьшается только на 5%. Самые тонкие манганиновые провода изготовляют диаметром 4μ ; их покрывают стеклянной изоляцией; километр такого провода весит меньше 1 г.

На рис. 90 представлена зависимость сопротивления некоторых металлов от температуры. Рис. 91 показывает, во сколько раз изменяется сопротивление железа, свинца и меди при нагревании их от 0°C на несколько сотен градусов. Мы видим, что повышение температуры железа до 600°C вызывает почти восьмикратное увеличение его удельного сопротивления. Повышение температуры до 500°C вызывает примерно трехкратное увеличение сопротивления меди. Сопротивление константана при этом остается почти неизменным.

Зависимостью электропроводности от температуры часто пользуются для измерения температуры посредством так называемых термометров сопротивления и болометров (а также термисторов, § 36).

Термометр сопротивления представляет собой проволоку (в большинстве случаев из чистой платины, никеля или железа), намотанную на крестообразную катушку из слюды и включенную в качестве одного из плеч в измерительный мостик Уитстона. В другой измерительной схеме термометр сопротивления включают в цепь тока небольшой величины и напряжение на термометре сопротивления, меняющееся в зависимости от температуры среды, подводят

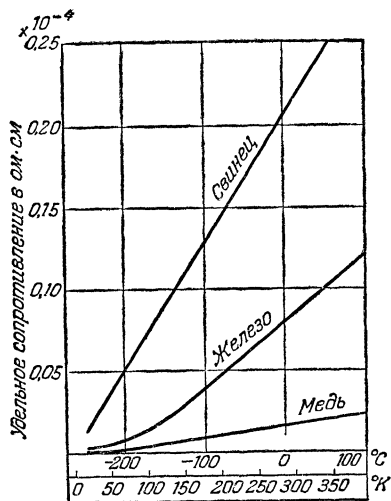


Рис. 90. Температурный ход удельного сопротивления чистых металлов.

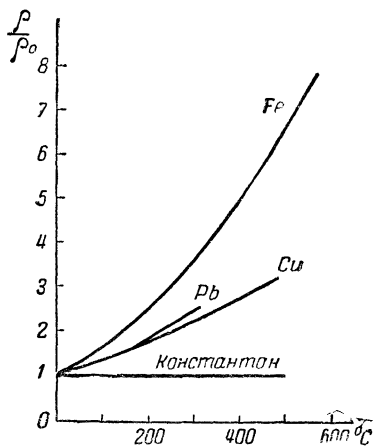


Рис. 91. Изменение удельного сопротивления металлов, отнесенного к сопротивлению при 0°C , в зависимости от температуры.

к прибору, который многократно усиливает это напряжение. Термометры сопротивления позволяют измерять температуру с точностью до тысячных долей градуса. Термометры сопротивления часто применяют для измерения высоких температур порядка нескольких сотен градусов, но эти термометры в особенности незаменимы при измерении низких температур. Термометры, предназначенные для измерения низких температур, часто изготавливают не из платиновой проволоки, а из свинцовой или золотой.

Болометры ¹⁾ представляют собой как бы разновидность термометров сопротивления, приспособленных для измерения теплого излучения. Вместо проволоки в болометрах применяют тончайшие ленты-лепестки из платины или никеля толщиной в доли микрона (около $0,05 \mu$). Для изготовления таких тонких платиновых лент покрывают платиновую жечь наплавленным на нее слоем серебра,

¹⁾ От греч. *bolos* — бросание, излучение.

в 10—20 раз более толстым, чем сама платиновая жечь, после чего прокатывают листы до толщины порядка микрона. Полученную тончайшую фольгу нарезают на узкие зигзагообразные полосы.

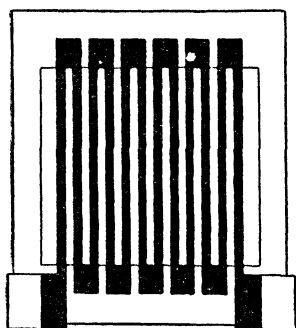


Рис. 92. Болومتر.

Изготовленные таким образом полоски фольги укрепляют на изоляторе и тогда стравливают серебро, после чего покрывают их платиновой черной или сажей, чтобы увеличить поглощение лучей (рис. 92). Рамку с зачерненной платиновой тончайшей лентой помещают в баллон; проводочные отводы от концов платиновой ленты выводят наружу и откачивают воздух из баллона. Посредством чувствительной или усиливающей аппаратуры измеряют сопротивление болометра (обычно в схеме мостика Уитстона) и по величине этого сопротивления определяют температуру, приобретенную метал-

лической лентой вследствие поглощенного ею теплового излучения; таким образом судят об интенсивности излучения. Малейшее изменение интенсивности излучения почти мгновенно сказывается на изменении сопротивления болометра.

Чувствительность болометров, подключенных к усиливающей аппаратуре, чрезвычайно велика: они реагируют на поток энергии в десятые и даже сотые доли эрга в секунду.

Удельное сопротивление металлов зависит не только от температуры, но также и от механических воздействий. При растяжении удельное сопротивление большинства металлов возрастает. Кроме того, при растяжении проволоки ее сопротивление возрастает также согласно закону Ома вследствие увеличения длины проволоки и уменьшения ее поперечного сечения. В целом эффект изменения сопротивления проволоки при растяжении оказывается довольно значительным.

Зависимость сопротивления проволоки от степени ее растяжения пользуются для измерения деформаций и механических напряжений. С этой целью изготавливают так называемые *тензометры*¹⁾ *сопротивления* («проволочные тензометры»). Тензометр сопротивления представляет собой тонкую константановую (реже нихромовую) проволоку диаметром в несколько сотых миллиметра, которую

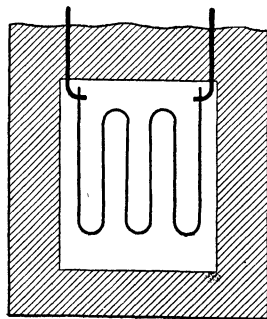


Рис. 93. Проволочный тензометр.

¹⁾ От лат. *tendere* — натягивать.

изгибают, как показано на рис. 93, и плотно приклеивают бакелитовым или целлюлозным лаком к исследуемой детали с таким расчетом, чтобы при деформации этой детали проволока тензомера испытывала растяжение. Проволочный тензометр включают в цепь тока и падение напряжения на нем подают на усилитель. При увеличении длины проволоочки вследствие растяжения на 1% ее сопротивление увеличивается на 2—3%. Проволочные тензометры широко применяются для исследования деформаций и усилий в разнообразных машинах и сооружениях (измеряемой величиной является относительная деформация; усилия определяют по закону Гука).

При плавлении удельное сопротивление многих металлов, например меди, серебра, цинка, свинца, олова и др., возрастает примерно в два раза. Исключение составляет висмут, удельное сопротивление которого при плавлении, напротив, убывает более чем в два раза; эта аномалия связана с аномальным изменением плотности — жидкий висмут более плотен, чем твердый (подобно воде).

Сопротивление некоторых металлов — алюминия, натрия, цезия — возрастает при плавлении только в полтора раза, а сопротивление ртути — в четыре раза.

Удельное сопротивление расплавленных металлов увеличивается при повышении температуры менее резко, чем у металлов в твердом состоянии. Так, например, температурный коэффициент сопротивления ртути $\alpha = 0,00092$. Опыты И. К. Кикоина показали, что сопротивление жидкого металла при повышении температуры остается постоянным, если одновременно с нагреванием металла увеличивать давление на него так, чтобы плотность металла, несмотря на повышение температуры, сохранялась неизменной.

В монокристаллах некубической системы обнаруживается анизотропия электропроводности, причем наибольшее сопротивление наблюдается в направлении, в котором атомы металла дальше всего отстоят один от другого, т. е. в направлении, перпендикулярном к плоскостям спайности.

На удельное сопротивление металлов чрезвычайно сильное влияние оказывают даже незначительные примеси. На рис. 94 показано

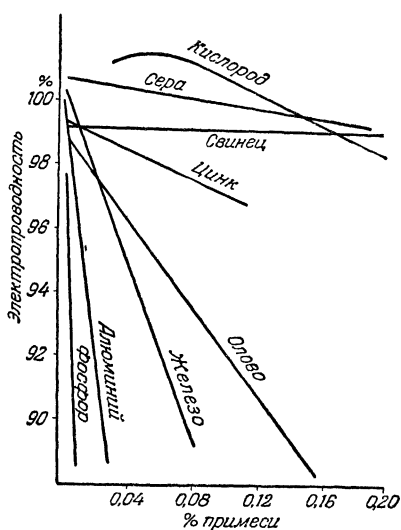


Рис. 94. Влияние примесей на электропроводность меди.

влияние примесей на электропроводность меди; на оси абсцисс отложен процент примесей, на оси ординат указано относительное (в процентах) изменение электропроводности меди.

Из этого рисунка видно, как резко уменьшается электропроводность меди при самых ничтожных содержаниях других металлов; например, примесь железа в количестве одной десятой доли процента понижает электропроводность меди более чем на 10%. Такое же понижение электропроводности меди (на 10%) вызывается присутствием одной тысячной доли процента фосфора.

Аналогичная (и, как видно из вышеприведенного примера, весьма сложная) картина влияния примесей на электропроводность наблюдается для всех металлов. Например, чистый никель более электропроводен, чем чистое железо, тем не менее добавка 2% никеля к железу увеличивает сопротивление железа в полтора раза. Чистая медь имеет электропроводность, в три раза большую, чем чистый цинк, тем не менее добавка 2% меди к цинку не повышает, но понижает электропроводность цинка почти на 20%; интересно, что последующие добавки меди вплоть до 5% и более уже не оказывают никакого влияния на электропроводность цинка.

Сопоставим удельное сопротивление металлов с удельным сопротивлением других тел.

Удельное сопротивление *полупроводников* — ряда минералов, в частности многих окислов металлов и соединений металлов с серой, — в противоположность тому, что наблюдается у металлов, с повышением температуры убывает и в некотором интервале температур убывает чрезвычайно резко: в сотни, тысячи, миллионы раз.

У многих *электролитов*, например у водных растворов кислот, солей, щелочей, удельное сопротивление в сотни тысяч — миллионы раз больше, чем у металлов. С повышением температуры оно не возрастает, как у металлов, а несколько уменьшается.

Удельное сопротивление высококачественных *изоляторов* в 10^{15} — 10^{20} раз превышает сопротивление металлов. Меньшее из этих чисел (10^{15}) характеризует отношение расстояния от Земли до Солнца к толщине листка бумаги.

Хорошими и часто применяемыми изоляторами являются: каучук, добываемый из сока некоторых растений; резина, являющаяся продуктом соединения каучука с серой («вулканизированный каучук»); синтетический каучук, получаемый химическим путем из спирта, ацетилен и других веществ; эбонит — соединение каучука с 30% серы и 5% сажи; слюда и меканит, который представляет собой склеенные шеллаком и спрессованные листки слюды; гетинакс, или изолит, и текстолит — листы бумаги, а в текстолите — слой хлопчатобумажной ткани, пропитанные бакелитовым лаком и спрессованные при нагревании под большим давлением; фибра — картон, обработанный хлористым цинком; фарфор, мрамор, пара-

фин, парафинированное дерево, целлулоид, церезин (искусственный воск). Наибольшее удельное сопротивление порядка 10^{16} — 10^{18} ом·см (при 18°C) имеют эбонит, церезин, слюда и парафин.

Имеется немало жидкостей, которые служат отличными изоляторами. Об этом свидетельствует приводимая здесь таблица удельных сопротивлений некоторых жидкостей-изоляторов.

Жидкость	Удельное сопротивление в ом·см
Этиловый спирт	$5 \cdot 10^3$
Дистиллированная вода	10^5 — 10^8
Чистейшая, перегнанная вода в вакууме	10^9
Трансформаторное масло	10^{12} — 10^{14}
Керосин	10^{16}
Жидкий воздух	10^{18}

При повышении температуры сопротивление изоляторов сначала медленно, затем все более резко уменьшается. Иногда нагревание на 10° ведет к уменьшению сопротивления изолятора во много раз.

Таким образом, только у металлов удельное сопротивление возрастает при повышении температуры. У электролитов, у полупроводников и изоляторов при повышении температуры удельное сопротивление уменьшается. Даже уголь, который, подобно металлам, является проводником первого рода, отличается от металлов тем, что его удельное сопротивление при повышении температуры несколько убывает.

§ 30. Закон Видемана — Франца. Теория электропроводности металлов

Не подлежит сомнению, что при прохождении электрического тока через металлический проводник носителями заряда являются электроны. Но как происходит движение электронов в металле в отсутствие электрического поля — на этот вопрос нелегко ответить.

Основатели классической электронной теории проводимости Друде и Лорентц считали, что внутри пространственной решетки, образованной ионами металла, имеется значительное количество свободных электронов, которые, участвуя в тепловом движении, составляют как бы электронный газ, заполняющий пространство между ионами.

Друде показал, что, исходя из представления об электронном газе и пользуясь основными закономерностями кинетической