

Как физики рисуют графики

Л. АШКИНАЗИ

ДЕЛАТЬ ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ – это при фиксированных значениях одних параметров изменять какие-то другие параметры и наблюдать за третьей группой параметров. Например, при фиксированной температуре проводника изменять напряжение и наблюдать за током. Узнаете закон? А вот другой эксперимент – при фиксированной температуре окружающей среды изменять напряжение и наблюдать за током. Заметили ли разницу? Понимаете ли, что второй эксперимент много проще? Как вы стали бы действовать, если надо было бы исследовать сопротивление именно при фиксированной температуре проводника? Всесторонний и подробный ответ на этот вопрос говорит о вашем понимании физики.

В каждой из трех групп параметров – фиксированные, изменяемые, наблюдаемые – может быть по одному параметру, но может быть и по несколько. Вот, например, температура – она на все годна. Изменяя напряжение и наблюдая (вспомните закон Ома) ток, можно или стабилизировать температуру, или сознательно ее изменять. А можно и не стабилизировать, и не изменять, а просто ее измерять. Это три разных эксперимента, и не все они просты. Вы обратили внимание, что мы не уточнили, о температуре проводника или о температуре окружающей среды идет речь? А это сильно меняет ситуацию – температуру окружающей среды и стабилизировать, и изменять в некоторых пределах относительно легко, а с температурой проводника могут быть проблемы.

Как вы думаете, в каких ситуациях температуру проводника легко изменять, а в каких это сложнейшая задача и непонятно, с какого бока к ней подступиться? Причем при постановке эксперимента и

при рассказе о нем многие параметры, которые, как мы считаем, влиять не должны, мы даже не упоминаем. Например, изменяя напряжение и наблюдая за током, мы не упоминаем, что ведем эксперимент при постоянной гравитации и постоянном атмосферном давлении. Правильно ли мы поступаем?

Сопротивление металлов с уменьшением давления на 1 атм (т.е. до нуля) уменьшается, а с увеличением на 1 атм монотонно (если при этом не изменяется кристаллическая решетка) увеличивается, изменяясь на $(5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4})\%$. Такими изменениями действительно часто можно пренебречь. Но, заметим, не всегда – например, если мы хотим изменять высокие давления, то использовать в качестве датчика просто кусок провода может быть и можно. Только надо вовремя вспомнить, что сопротивление зависит не только от давления, но и от температуры и как-то это учесть. Кстати, как?

Есть несколько разных способов. Надежнее всего стабилизировать температуру, но это не всегда возможно. Можно действовать иначе – измерять температуру и вносить поправки. Проблема будет состоять в том, что изменение давления может влиять на работу того, что измеряет температуру. Третий способ – расположить рядом с тем, на что влияют и давление, и температура, такой же проводник и при такой же температуре, но вне зоны, где изменяется давление, и вычитать из одного сигнала другой. Но это опять же не всегда возможно.

Не верьте тому, кто скажет, что физика – это просто. Правда, физика интересна, но это немного другое. Когда эксперименты проделаны, их результаты надо изложить в таком виде, чтобы они были интересны и понятны другим физикам. Да и для собственного понимания это бывает

полезно. Физическая традиция такова, что изображается либо график зависимости одного наблюдаемого параметра от одного изменяемого, либо на одном рисунке совмещаются два или больше графиков – зависимости нескольких наблюдаемых параметров от одного изменяемого параметра, либо «объемный» рисунок – зависимость от двух параметров, ее еще называют «поверхность отклика». Во всех случаях на осях стоят значения параметров, однако далеко не всегда значения начинаются с нуля и идут по оси равномерно. При этом всяческие особенности могут обнаружиться и на оси абсцисс, и на оси ординат.

Теперь рассмотрим несколько конкретных примеров. Картинки взяты из разных статей в «Журнале технической физики» (№ 1 за 2023 год). Можно было взять любой другой физический журнал, примеры тогда были бы другие, но существо дела не изменилось бы. Физический смысл изображенных результатов мы не рассматриваем, на уровне школьного курса это в большинстве случаев невозможно. Нас сейчас интересует только то, как строится «картинка» – изображение того, что получилось, на графике. Кстати, умение быстро «схватить» физическое изображение, картинку с графиками, полезно и при серьезной работе (которая включает, кроме всего прочего, чтение физических журналов).

На рисунке 1 представлен самый простой случай – показана шероховатость поверхности вдоль какой-то линии. Да,



Рис. 1. Профиль поверхности

вот такая поверхность – не поцарапайтесь! По оси абсцисс отложено перемещение вдоль поверхности (в микрометрах), по оси ординат – высота поверхности (микрометры). Шкалы равномерные, но масштаб разный, так что не все так страшно. Где на осях ноль, в данном случае не важно, линейку в пространстве можно располагать, как угодно. Правда, географы отсчитывают высоты «от уровня моря», а строители «от уровня земли», т.е. у них есть, скажем так, естественный ноль. При изображении профиля поверхности часто используют «среднюю линию» и отсчитывают высоту пиков и глубину ям от нее, но в данном случае среднюю линию не провели. Кстати, если бы вас попросили, как бы вы это сделали?

На рисунке 2 экспериментальные точки явно ложатся на прямую, показаны четыре зависимости емкости в пикофарадах от напряжения в вольтах, причем параметров для самих зависимостей два. Один параметр показан цифрами, это температура в кельвинах (420 К для верхней зависимости, 220 К для остальных трех). Другой параметр показан цветом и формой значка, в данном случае это частоты, на которых производились измерения, но на самом рисунке это не указано. На оси абсцисс ноль справа, на оси ординат ноль внизу, шкалы равномерные.

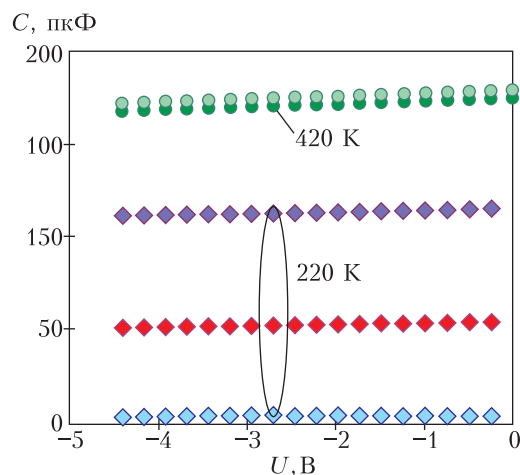


Рис. 2. Зависимость емкости некоторой полупроводниковой структуры от напряжения при разных температурах

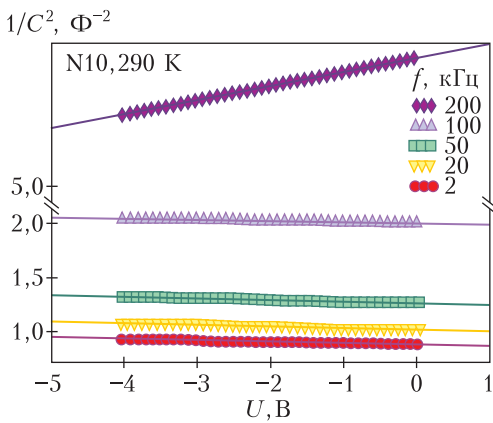


Рис. 3. Еще одна зависимость емкости полупроводниковой структуры от напряжения при разных температурах

Рисунок 3 иллюстрирует более сложный случай. По оси абсцисс отложено напряжение в вольтах, шкала равномерная, ноль не на краю, а ближе к правому краю. Ось ординат устроена фантазмагически – во-первых, она с разрывом, но по разные стороны одинаковый масштаб, во-вторых, ноль вне пределов шкалы, в-третьих, на ней показана емкость, но не она сама, а в степени минус два, т.е. $1/C^2$, соответственно размерность – фарада в степени минус два. Параметр – частоты, на которых производились измерения, это показано цветом и формой значка. Параметр $1/C^2$ выбран именно потому, что в этом случае зависимость должна по теории быть прямой – и точки действительно ложатся на прямую. Обычно, когда кроме экспериментальных точек на картинке рисуют линию, это либо теоретическая зависимость (при каких-то подгоночных параметрах), либо эмпирическая зависимость, т.е. «проведенная через точки». Ну и заметим, что одинаковость масштабов на оси ординат ниже и выше разрыва на рисунке не указана, это лишь естественная гипотеза. Потому что выше разрыва есть только одно деление, а следовало бы дать два или три.

На рисунке 4 показана простая и частая ситуация, это так называемые логарифмические координаты. На оси абсцисс отложена какая-то концентрация, судя по индексу – электронов, на оси ординат – модуль какого-то выходного напряжения.

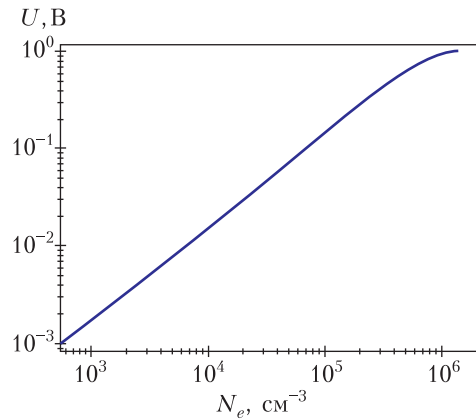


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения детектора от концентрации электронов в плазме

Автор хотел показать, что логарифмы этих величин пропорциональны (кроме области высоких концентраций), но, обратите внимание, сами эти величины не вполне пропорциональны (напряжение растет немного медленнее, чем концентрация).

Рисунок 5 демонстрирует полулогарифмические координаты, по оси абсцисс приведено время в миллисекундах, по оси ординат – та же самая концентрация, точнее ее логарифм. Показаны явно экспериментальные точки, но полученные, скорее всего, двумя разными методами (в тексте это указано, но можно было бы указать и на рисунке). Результаты явно показывают, что зависимость одна во всем диапазоне. Разве что при самых больших временах видны какие-то особенности.

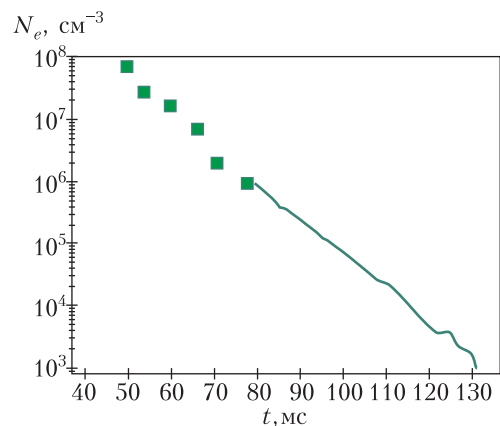


Рис. 5. Зависимость концентрации электронов в плазме от времени

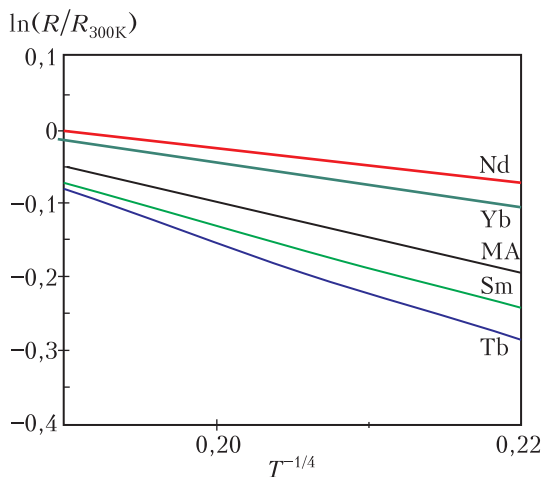


Рис. 6. Зависимость сопротивления сплава от температуры

На рисунке 6 мы видим простую, но экзотическую ситуацию. По оси абсцисс отложена температура, причем в виде $T^{-1/4}$, по оси ординат – логарифм относительного сопротивления. Автор исследовал температурную зависимость сопротивления каких-то сплавов с добавками к основному составу (который на рисунке загадочно обозначен «МА») четырех редкоземельных элементов, при этом самарий и тербий сопротивление уменьшали, а неодим и иттербий увеличивали. Но самое загадочное было в том (и рисунок явно это демонстрирует), что и базовый сплав, и варианты с добавками имели совершенно необычную зависимость удельного сопротивления от температуры – логарифм сопротивления был пропорционален $T^{-1/4}$.

На рисунке 7, как видно из размерностей, по оси абсцисс отложено время, по оси ординат – удельная проводимость. Показана весьма сложная зависимость, предсказываемая теорией, – кривая 1: константа, потом резкий спад, потом прямая в логарифмических координатах. Экспериментальные результаты – кривая 2 – ведут себя очень прилично, за исключением немонотонности при самых больших временах.

Теперь, когда мы рассмотрели несколько примеров, пора обсудить, чем определяются выбор осей координат, их оцифровки и метода представления данных. Первый, самый простой и очевидный фак-

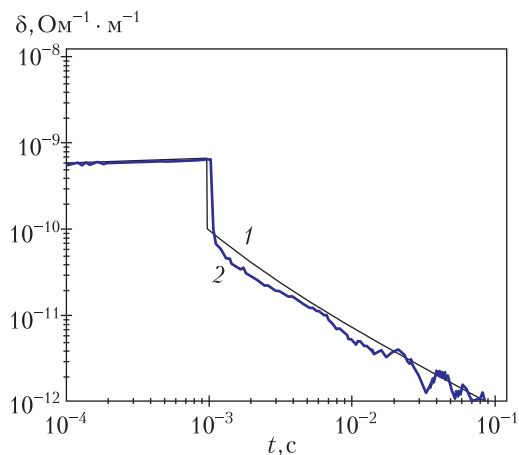


Рис. 7. Зависимость удельной проводимости от времени

тор: пределы изменения переменной на оси абсцисс и результирующей величины на оси ординат должны быть такими, чтобы поместились все данные, которые мы хотим показать. Если диапазон невелик, то шкала может быть линейная, если диапазон разрывается на две области, а средние значения не информативны, можно на оси показать разрыв, если какой-то кусок содержит важные детали, можно его растянуть, если диапазон велик, скажем два порядка и больше, то надо использовать «сжимающую», например логарифмическую, шкалу. Выбор именно логарифмической шкалы хорош тем, что во многие физические формулы входит экспонента и при надлежащем выборе форм представления параметров кривая становится прямой, а зависимость – понятной.

Второй фактор: хотим ли мы показать какое-либо сравнение. Например, эксперимента с теорией (в том числе с экстраполяцией), нескольких теорий, нескольких экспериментов. Причем эти несколько экспериментов могут быть сделаны просто с разными объектами, с одним и тем же объектом, но при разных значениях какого-то другого параметра (самый частый случай), при измерении какими-то разными методами, наконец – это могут быть данные разных авторов.

Третий фактор: сравнение эксперимента с теорией в условиях, когда наблюдаемый параметр по теории должен зависеть от

изменяемого параметра не линейно, а как-то сложнее. Тогда на осях надо откладывать такие величины, чтобы теоретическая зависимость изображалась прямой линией – тогда проще сравнивать. Например, если бы мы изучали зависимость полной излучаемой мощности от температуры $N = \xi \sigma T^4 S$, где ξ – коэффициент излучения, σ – постоянная Стефана–Больцмана, T – температура, S – площадь, то нам следовало бы откладывать на осях не N и

T , а N и T^4 и отклонения от прямой интерпретировать как отличие ξ от константы.

И в заключение – два вопроса. Как мы выбираем, какую величину откладывать по горизонтальной оси, а какую по вертикальной? Почему на осях почти всегда увеличение величины происходит при движении слева направо? Причем ответ «по традиции» не засчитывается, потому что любая традиция возникла почему-то.



СМЕШИВАНИЕ КРАСОК

... Когда я делал диплом в Принстоне, я частенько бывал в симпатичном маленьком ресторанчике, который назывался «Папино место». Однажды, когда я там обедал, недалеко от меня сел маляр в рабочем комбинезоне. Он спустился со второго этажа, где красил комнату. Каким-то образом между нами завязалась беседа, и он начал говорить о том, как много нужно знать для того, чтобы заниматься малярным делом. «Например, – сказал он, – если бы *Вам* пришлось красить стены в этом ресторане, какой цвет *Вы* бы выбрали?»

Я ответил, что не знаю, на что он сказал: «Стены нужно красить в темный цвет до такой-то высоты, потому что, видите ли, люди, сидящие за столами, трутся локтями о стены, так что белая стена тут не подойдет. Она слишком быстро становится грязной. Но над темной краской *должна быть* белая, чтобы создать в ресторане ощущение чистоты?»

Видимо, парень действительно разбирался в том, о чем говорил, так что я сидел, развесив уши, когда он сказал: «Кроме того, нужно разбираться в цветах: знать, как при смешивании красок можно получить различные цвета. Например, какие цвета *Вы* смешали бы, чтобы получить желтый?»

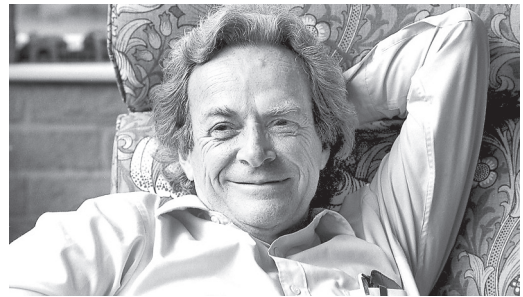
Я понятия не имел, как можно получить желтый цвет, смешивая краски. Если речь идет *о свете*, то нужно смешать зеленый и красный, но я знал, что он говорит *о красках*. Поэтому я сказал: «Я не знаю, как получить желтый цвет без желтой краски».

– Ну что же, – сказал он, – если смешать красную и белую краски, то получится желтая.

– Вы уверены, что получится не розовая?

– Конечно, – сказал он, – получится желтая.

Я поверил, что он получит желтый цвет, потому что он был профессиональным маля-



Ричард Филлипс Фейнман

ром, а я всегда восхищался людьми подобных профессий. Но мне все равно было интересно, как он это делает.

Тут меня осенило. «Должно быть, происходит какое-то изменение в *химическом составе*. Может быть, *Вы* используете какой-то особый вид пигментов, которые изменяют химический состав краски?»

– Да нет, – сказал он, – подойдут любые старые пигменты. Сходите в хозяйственный магазин, купите краску – обычную банку красной краски и обычную банку белой краски, – я их смешаю и покажу *Вам*, как получается желтый цвет.

В этот момент я подумал: «Что-то здесь не так. Я достаточно знаю о красках, чтобы знать, что в таком случае желтый цвет получить невозможно, но *он*, должно быть, знает, что желтый цвет *получается*, а значит, происходит что-то интересное. Я должен это увидеть!»

Поэтому я сказал: «Хорошо, я принесу краску».

Маляр поднялся наверх, чтобы закончить работу, а ко мне подошел хозяин ресторана и сказал: «В чем смысл вашего спора? Он маляр и всю жизнь был маляром, и *он*

(Продолжение см. на с. 31)