

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ
КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ И УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИМ ЭКСПЕРИМЕНТОМ

И.С. Лискер

Проблему поиска и исследования новых полупроводниковых материалов, обладающих важными для науки и техники свойствами, можно представить в виде некоторого единого замкнутого цикла, основными звеньями которого являются:

1) Разработка технологии получения исходных веществ (выбранных для первоначального изучения) и синтеза их производных. Сюда относятся такие вопросы, как, например, тонкая очистка исходных веществ от посторонних примесей, синтез более сложных многокомпонентных соединений, выращивание монокристаллов как простых, так и сложных веществ, искусственное введение различного рода примесей и нарушений химического и структурного состава для оценки их влияния на свойства вещества и т.п.

2) Исследование физико-химических и физических свойств исходных и синтезированных соединений (рентгеноструктурных, термографических, электрических, магнитных, тепловых, фото-электрических и т.д.) в условиях воздействия различных внешних факторов (температуры, давления, электрических, магнитных и световых полей, ионизирующих излучений и т.п.), действующих на исследуемый образец как порознь, так и в различных комбинациях.

3) Переработка полученной информации: анализ и обобщение

экспериментальных данных, разработка и развитие различных теорий и гипотез, сопоставление новых данных с имеющимися, сравнение теории с экспериментом и т.п.

Конечным результатом работы по такому замкнутому циклу является выдача новых рекомендаций в двух аспектах: а) по продолжению исследований в наиболее перспективном направлении и б) по использованию уже обнаруженных полезных свойств исследованных материалов на практике - в технике и промышленности.

Наиболее общим требованием, которое можно было бы предъявить ко всем трем вышеперечисленным звеньям проблемы поиска и изучения физических свойств новых полупроводниковых веществ является получение результатов исследования в кратчайшее время. При этом, естественно, должна быть соблюдена достаточная точность получения и переработки первичной информации.

В настоящее время решение этой важнейшей проблемы требует огромной затраты времени, труда и средств, поскольку первые два звена рассмотренного замкнутого цикла выполняются различными исследователями, в разное время и в неодинаковых экспериментальных условиях. А это, в свою очередь, затрудняет и работу третьего звена.

В связи с этим возникает необходимость коренного ускорения процессов поиска новых полупроводниковых материалов. Радикальное решение этого вопроса, как нам кажется, может быть найдено только на основе разработки автоматических методов проведения технологических операций и физического исследования, управления ими, получения и обработки информации. В настоящее время представляется затруднительным обеспечить выполнение технологических операций, измерение свойств изучаемых материалов и последующую обработку полученных результатов в едином процессе автоматизированного физического исследования. Однако совмещение отдельных работ по второму и третьему звеньям общей проблемы в течение одного физического эксперимента уже сейчас оказывается реально осуществимым и будет рассмотрено в данной работе.

Изложение этого вопроса мы начнем с анализа общего времени τ , затрачиваемого на проведение физического исследования и равного

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5$$

Здесь τ_0 - минимальное время, которое может быть затрачено на измерение n исследуемых параметров в течение непрерывно-

го изменения каких-либо факторов внешнего воздействия m (например, температуры, давления и т.п.). Здесь имеется в виду та наибольшая скорость изменения факторов m , при которой еще не нарушаются основные физические принципы эксперимента;

τ_1 - дополнительное время, обусловленное необходимостью измерения каждого из n параметров на различных установках и на разных образцах. Это объясняется различными принципами, положенными в основу конструирования измерительных установок, каждая из которых предназначена для измерения одного параметра;

τ_2 - дополнительное время, потраченное на измерения, вследствие несовершенства существующих способов определения характеристик полупроводников (например, применение стационарных методов);

τ_3 - дополнительное время, затраченное самим исследователем на управление и регулирование одного фактора внешнего воздействия;

τ_4 - дополнительное время, затраченное исследователем на управление и регулирование при числе факторов $m > 1$, на поиски оптимальных режимов опыта и оптимальных свойств исследуемого образца;

τ_5 - время, израсходованное самим исследователем на обработку первичной информации, сравнение теории с экспериментом и т.д. (см. третье звено общей проблемы).

Отметим, что общее время, затраченное на изучение физических свойств полупроводниковых материалов составляет обычно многие недели и месяцы.

С целью сокращения общего времени τ некоторыми исследователями [1-8] были разработаны экспериментальные установки, в которых уже определяется несколько параметров на одном исследуемом образце при различных фиксированных температурах образца. Это уже давало некоторую экономию времени за счет значительного уменьшения величины τ_1 . Однако при этом переход в процессе опыта от измерения одного параметра к другому, регулирование источников внешнего воздействия и все действия, связанные с этим, осуществляются непосредственно самим исследователем, а обработка результатов измерения и все последующие вычисления выполняются после окончания эксперимента. Поскольку эти измерения основаны на сочетании стационарных методов исследования в одной установке, они не дают значительного выигрыша во времени τ и по-прежнему фактически привязывают исследователя к экспериментальной установке на все время проведения эксперимента.

Резкого сокращения общего времени τ удалось добиться, благодаря разработке нестационарных [9,10], а на их основе и динамических [11] методов исследования параметров полупроводниковых материалов. В результате этого была проведена значительная автоматизация физического эксперимента (при этом одновременно уменьшилась погрешность измерения определяемых параметров в сравнении со стационарными методами).

Нестационарные методы отличаются тем, что в них исключаются побочные паразитные эффекты, возникающие при измерении какого-либо основного параметра. К таким параметрам относятся, например, электрические (электропроводность), термоэлектрические (коэффициент термоэдс), теплофизические (коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость), гальвано- и термоманитные (эффект Холла, поперечный термоманитный эффект Нернста-Эттингсгаузена, изменение сопротивления в магнитном поле и т.п.) и др. Суть нестационарных методов заключается в том, что электродвижущие силы (эдс), пропорциональные измеряемым физическим параметрам, определяются с помощью быстродействующих регистрирующих приборов в нестационарном режиме, в связи с чем представляется возможным разделить во времени быстропротекающие физические процессы, связанные с электронной природой изучаемых эффектов, от медленно протекающих процессов, обусловленных инерционностью других эффектов (например, распространения тепловых потоков в образце).

Эти методы позволили, благодаря мгновенной фиксации измеряемых величин проводить измерения не только в статических условиях (при постоянной температуре, давлении и т.п.), но и в динамическом режиме - при непрерывном изменении факторов внешнего воздействия.

С целью дальнейшего повышения производительности физического эксперимента была разработана модель прибора [11], в которой все действия, связанные с процессом измерения некоторых из перечисленных выше параметров (электропроводности и коэффициента термоэдс), автоматизированы и осуществляются по единой жесткой программе (т.е. без автоматической обработки результатов измерений и управления экспериментом и т.п.). Блок-схема модели системы автоматического научного исследования, работающей по прямой жесткой программе (рис.1), состоит из источников внешнего воздействия, исследуемого объекта, устройств для сбора информации, коммутатора каналов информации и устройства регистрации информации. На рис. 2 представлена диа-

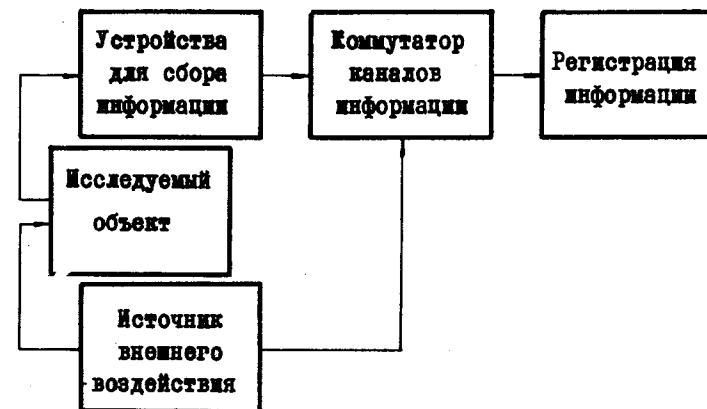
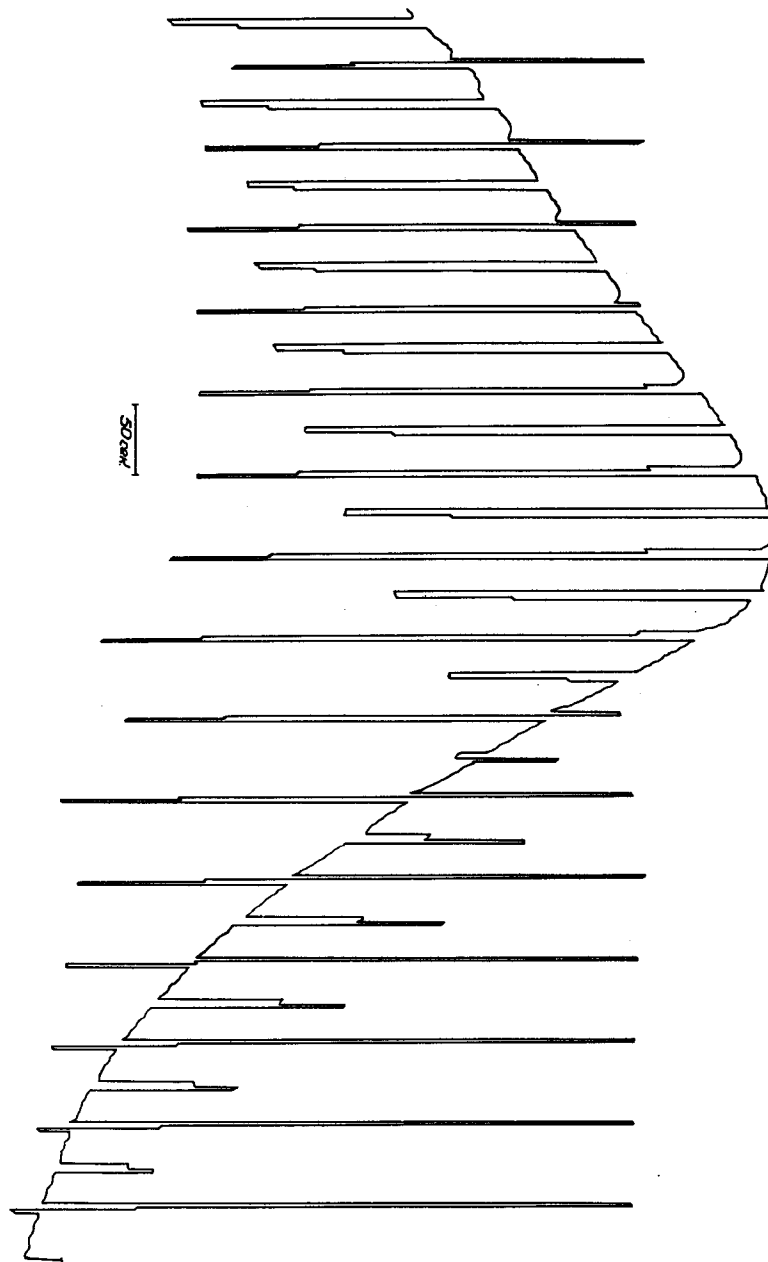


Рис. 1. Модель прямой жесткой системы автоматического научного эксперимента.

Рис. 2. Характер записи измеренной информации.



граммная лента, на которой виден характер записи всей поступающей информации. Описанная модель системы автоматического измерения физических величин оказалась весьма эффективной и позволила проводить процесс определения величин электропроводности и коэффициента термоэдс в широком интервале температур в течение 0,5–1 часа, освободив при этом исследователя от непосредственного участия в работе прибора.

В результате, общее время τ значительно сократилось (выигрыш во времени получился за счет исключения величин τ_1 , τ_2 и τ_3) и стало равным

$$\tau' = \tau_0 + \tau_4 + \tau_5.$$

Однако, хотя прямая жесткая программа и позволила автоматизировать экспериментальную часть системы физического исследования, она не избавила оператора от необходимости самому проводить обработку информации, выполнить все вычисления и т.п. Кроме того, в этой системе невозможно автоматически изменять программу измерения и программу управления внешними факторами воздействия ($m > 1$) на объект в процессе ведения опыта.

Поэтому дальнейшим шагом в области ускорения физических исследований является совмещение экспериментальной установки с электронной вычислительной машиной (ЭВМ) в единой системе автоматизации научного эксперимента [12]. Тогда оказывается возможным исключить из выражения τ' члены τ_4 и τ_5 , сделав общее время

$$\tau'' \approx \tau_0.$$

В этом случае исследователю достаточно составить физическую программу исследования, в соответствии с которой ЭВМ непосредственно в процессе эксперимента проведет всестороннюю обработку результатов измерения, выполнит все вычисления и возьмет на себя управление ходом эксперимента.

Покажем, что на основе нестационарных и динамических методов определения физических свойств полупроводников имеется реальная возможность сократить общее время эксперимента до величины τ_0 , объединив в одном исследовании второе и третье звенья всей проблемы и создать приборы и устройства, работающие совместно с ЭВМ. Блок-схема модели такой системы автоматического научного эксперимента представлена на рис.3. В ней в отличие от блок-схемы рис.1 информация с коммутатора канала информации через систему связи поступает в ЭВМ. Причем ЭВМ со-

единена через систему связи и коммутирующий блок с исполнительными устройствами источников внешнего воздействия. Таким образом, блок-схема рис.3 образует замкнутую и гибкую систему автоматического научного исследования.

Для иллюстрации возможностей такой системы рассмотрим конкретный пример. Пусть требуется провести исследование электрических, термоэлектрических, гальвано- и термоманитных свойств образца из полупроводникового вещества в широком интервале температур.^{х)}

Исследуемый образец в виде цилиндра или параллелепипеда с прикрепленными к нему зондами 1,2 и 3 включается в электрическую схему, изображенную на рис.4а, и помещается между полюсами электромагнита (рис.4б). Токовая цепь состоит из батареи B_1 , переключателя K_1 , эталонного сопротивления R_1 , регулировочного реостата R_2 и образца. К торцам образца прикрепляются токоподводящие пластины, создающие равномерное электрическое поле вдоль образца и термопарные провода (например, хромелевые X_1 и X_2 и алумелевые — A_1 и A_2). Термопары соединены между собой так, что позволяют производить измерения перепада температуры на образце и абсолютной его температуры. Термопара $A_3 - X_3$ помещается в среду с фиксированной температурой. Нагрев образца и перепад температуры на нем (T_1 и T_2 — соответственно температуры торцов образца) создаются каким-либо внешним источником тепла. Схема включения магнита состоит из источника постоянного тока B_2 , сопротивлений R_3 и регулировочного R_4 , переключателя K_2 и обмотки электромагнита W . Величина тока I , протекающего через образец, и напряженность магнитного поля H измеряются с помощью эталонных сопротивлений R_1 и R_3 , падение напряжения с которых V_I и V_H подаются на вход регистрирующего прибора. Естественно, что в процессе проведения опыта образец может находиться (в зависимости от поставленной задачи и свойств исследуемого вещества) при различных условиях окружающей среды — камере спокойного воздуха, вакууме или в атмосфере инертного газа, засыпке из мелкодисперсного материала и т.п.

^{х)} Следует отметить, что нестационарные методы могут быть также применены к исследованию и других параметров полупроводников (например, фотоэлектрических, тепловых, магнитных и т.д.), которые можно измерять наряду с описанными выше, однако для простоты в этом примере они не приводятся).

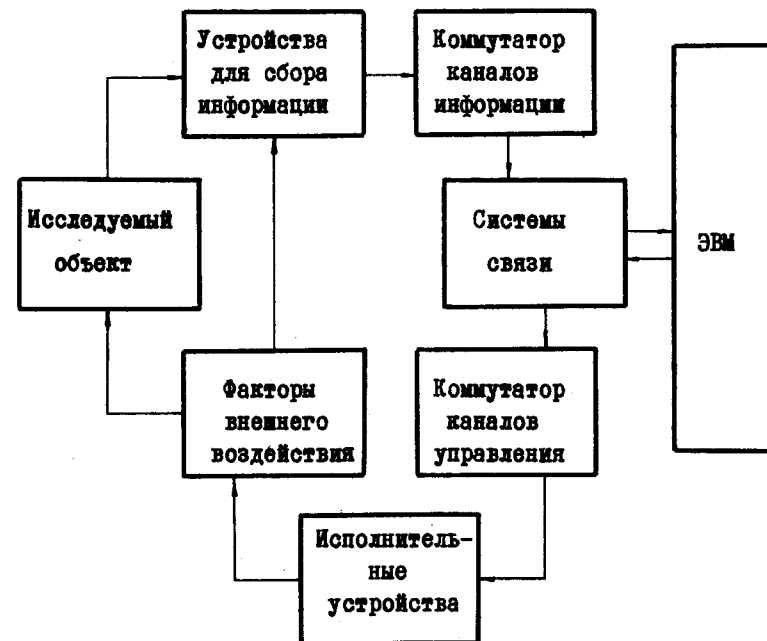


Рис. 3. Блок-схема модели замкнутой системы автоматического научного исследования.

Из принципиальной электрической схемы (рис.4 а,б) видно, что все измеряемые величины, необходимые для вычисления физических характеристик образца, получаются в виде напряжений и могут фиксироваться одним регистрирующим прибором, стоящим на выходе схемы, и затем далее преобразовываться блоком кодирования информации в численные значения, удобные для последующей работы ЭВМ. При этом программа исследования составляется с таким расчетом, чтобы измерение величин, пропорциональных искомым параметрам и температуре, при которой они определяются, производилось с некоторым сдвигом во времени, но так, чтобы между эдс, пропорциональной температуре образца, и эдс, пропорциональными измеряемому параметру, время $\Delta \tau$ не превышало, скажем, 1-1,5 сек. Тогда за время измерения данного параметра температура образца, при которой он измерялся, не успеет измениться (это условие легко выполняется при скоростях нагрева образца порядка $20^\circ/\text{мин.}$ и менее).

Для определения электропроводности ЭВМ включает вначале термопару ($T_1 - T_3$) и производит мгновенное измерение температуры образца. Затем ЭВМ отключает термопарную цепь и выдает команду на измерение паразитной термоэдс $V_{T \text{ эдс}}$ на зондах 1,2 при отсутствии тока через образец (эта термоэдс возникает за счет перепада температур, имеющегося на образце) в течение нескольких десятых долей секунды. Следующая операция - измерение падения напряжения на зондах V_ϕ при включении через образец тока I и, наконец, измерение величины V_γ - падения напряжения, снимаемого с эталонного сопротивления R . Общий вид записи измеряемых величин и очередность их регистрации приведен на рис.5а. После окончания измерения электропроводности ЭВМ выдает команду на повторное измерение температуры образца $V_{T\phi}$. Общий цикл измерения составляет примерно 1 сек. Затем следует пауза в 10-12 сек, необходимая для того, чтобы машина произвела соответствующие вычисления и успела бы их отпечатать на бумаге. Очевидно, что длительность импульсов определяется инерционностью прибора, измеряющего его амплитуду. Во избежание ошибок измерения регистрирующий прибор должен быть построен на компенсационном принципе. Вычисления производятся по формулам:

$$T_\phi = \frac{V_{T\phi}}{\alpha_{\lambda A}}, \quad (1)$$

$$\rho(T) = \frac{l_3}{R, S} \cdot \frac{V_\gamma}{V_\phi - V_{T \text{ эдс}}}, \quad (2)$$

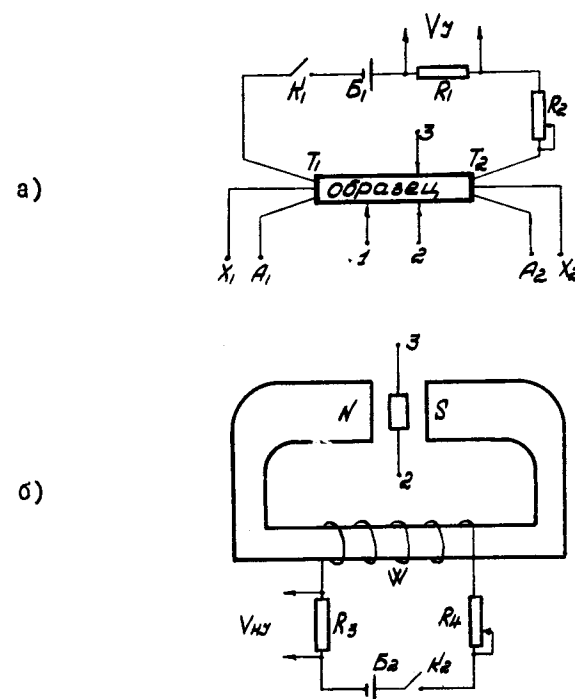


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема измерения электрических, термоэлектрических, гальвано- и термомагнитных эффектов в полупроводниках.

где ℓ_3 и S - расстояние между зондами и площадь сечения образца, соответственно;

$\alpha_{x\lambda}$ - коэффициент термоэдс хромель-алюмелевой термопары.

Коэффициент термоэдс определяется следующим образом. На I-м этапе измеряется температура образца, на 2-м - определяются величины термоэдс V_{x_1, x_2} и V_{λ_1, λ_2} порознь на хромелевых и алюмелевых проводах и на 3-м - вновь определяется $V_{T\lambda}$. Общий вид кривой измерения коэффициента термоэдс показан на рис. 5б. Коэффициент термоэдс определяется по формуле:

$$\alpha_{(T)} = \left[\frac{1}{2} \alpha_{x\lambda}(T) \cdot \frac{V_{x_1, x_2} + V_{\lambda_1, \lambda_2}}{V_{x_1, x_2} - V_{\lambda_1, \lambda_2}} + \frac{(\alpha_{xpt} - \alpha_{\lambda pt})}{2} \right] \frac{мкВ}{град} \quad (3)$$

Здесь знаки "+" и "-", получающиеся в результате вычисления, характеризуют знак коэффициента термоэдс относительно платины, т.е. знак носителей тока в исследуемом образце. Знак добавочного члена в выражении (3) определяется величинами V_{x_1, x_2} и V_{λ_1, λ_2} . Если $V_{x_1, x_2} < V_{\lambda_1, \lambda_2}$, то это значит, что образец имеет положительный коэффициент термоэдс и поправка имеет знак "+", если же $V_{x_1, x_2} > V_{\lambda_1, \lambda_2}$, то поправка имеет знак "-".

После измерения электропроводности и коэффициента термоэдс ЭВМ выдает команду на измерение эдс Холла и Нернста-Эттингсгаузена. Для этого опять вначале измеряется температура образца V_{Tx} , затем в порядке очередности - паразитная эдс $V_{T\lambda c x}$ на холловских зондах 2,3 в отсутствие магнитного поля H и электрического тока J ; затем включается электромагнит и измеряется мгновенное значение эдс $V_{H-\lambda}$, обусловленной поперечным термомагнитным эффектом Нернста-Эттингсгаузена. Следующий импульс регистрирует величину падения напряжения (на эталонном сопротивлении R_3) V_{HJ} , пропорциональную напряженности магнитного поля H , при которой была измерена величина $V_{H-\lambda}$. Четвертый и пятый импульсы (измеряемые при поле $H=0$), соответственно, фиксируют падение напряжения на холловских зондах V_{Rx} , обусловленное их неэквивалентностью, и величину V_{Jx} , пропорциональную току, который пропусклся через образец. Шестой импульс V_{J+H} - падение напряжения на зондах (2-3) - фиксируется при одновременном быстром включении и выключении электрического тока и магнитного поля. Благодаря такому способу измерения оказываются исключенными все паразитные эффекты, и величины эдс Холла и Нернста-Эттингсгаузена легко определяются из сопоставле-

ния импульсов, приведенных на рис. 5в.

$$V_x = V_{J+H} - V_{H-\lambda} - V_{Rx} \quad (4)$$

$$V_{(H-\lambda)_0} = V_{H-\lambda} - V_{T\lambda c x} \quad (5)$$

Для определения относительного изменения сопротивления в магнитном поле измерения производятся на зондах 1,2. Запись информации осуществляется в следующем порядке. Вначале определяется температура образца $V_{T\Delta\rho}$, затем фиксируется: величина термоэдс $V_{T\lambda c \Delta\rho}$ при отсутствии электрического тока ($J=0$) и магнитного поля ($H=0$); падение напряжения $V_{J\Delta\rho}$ - при пропускании через образец тока J в магнитном поле $H=0$; эдс $V_{H-\lambda}^{np}$, обусловленная продольным термомагнитным эффектом Нернста-Эттингсгаузена и, наконец эдс $V_{\Delta\rho}$, возникающая при одновременном включении тока J и поля H . Эпюра кривых, регистрируемых при определении $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, представлена на рис. 5г. Формулы, по которым определяются относительное изменение сопротивления и продольный термомагнитный эффект Нернста-Эттингсгаузена, имеют вид:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{V_{\Delta\rho} - V_{H-\lambda}^{np} - V_{J\Delta\rho} - 2E_{T\lambda c \Delta\rho}}{V_{J\Delta\rho} - V_{T\lambda c \Delta\rho}} \quad (6)$$

$$V_{(H-\lambda)_0}^{np} = V_{H-\lambda}^{np} - V_{T\lambda c \Delta\rho} \quad (7)$$

Итак, в результате проведенного эксперимента в течение одного опыта оказывается возможным не только определять в динамическом режиме первичные параметры исследуемого образца, как например σ , α , V_x , $V_{H-\lambda}$, $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ и $V_{H-\lambda}^{np}$, но и вычислить на основании существующих теорий непосредственно в процессе измерения такие физические характеристики вещества, как концентрация, подвижность и эффективная масса носителей тока в широком интервале температур.

Общее время $\tau'' \approx \tau_0$, затраченное в данном эксперименте на определение комплекса параметров полупроводниковых материалов (при факторе $m=1$) может составлять не более 0,5-1 часа.

Таким образом, в результате проведенного анализа подтвер-

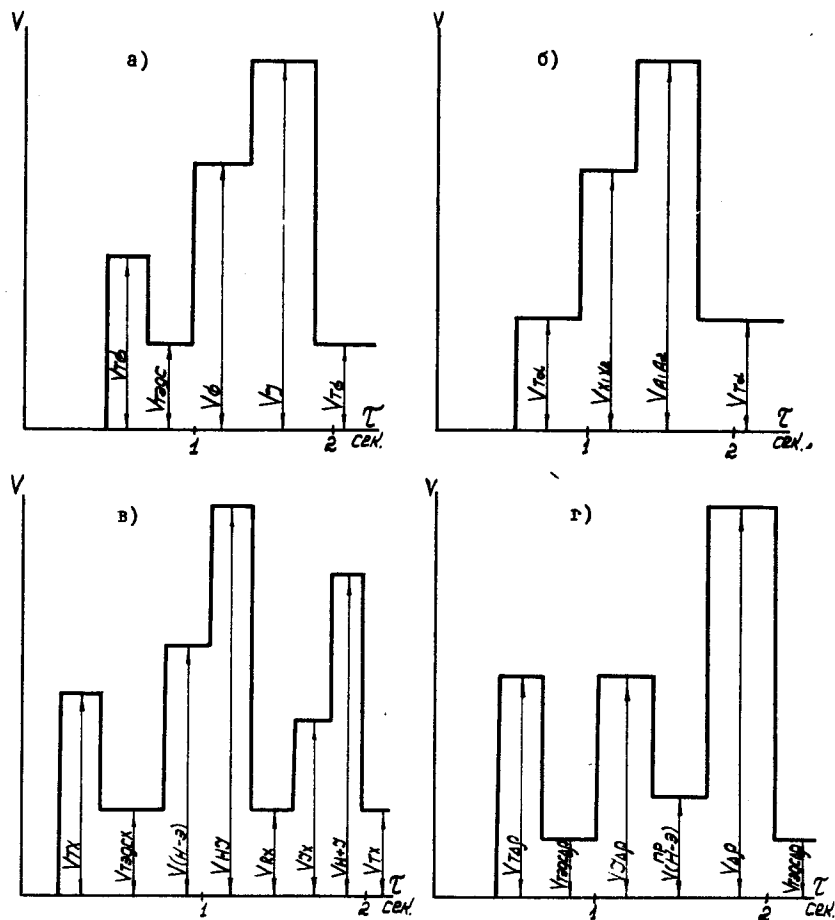


Рис. 5. Общий вид записи измеряемых величин и порядок их регистрации при измерении электропроводности (а), коэффициента термоэдс (б), эффектов Холла и Нернста-Эттингсгаузена (в) и изменения сопротивления в магнитном поле (г).

ждается полная возможность создания единой замкнутой гибкой системы автоматического научного исследования для определения физических свойств полупроводников. Такая система позволит общее время, затрачиваемое на проведение полного физического исследования, свести к величине τ_0 . При этом за время τ_0 она сможет выполнить следующие физические аспекты, входящие во второе и третье звенья общей проблемы поиска и исследования новых полупроводниковых материалов:

1. Измерение, обработка результатов опыта и вычисление первичных данных исследования (например, электропроводности, коэффициента термоэдс, постоянной Холла-эдс Нернста-Эттингсгаузена, коэффициента теплопроводности, фотоэдс, электрической емкости, индуктивности и т.п.).

2. Вычисление вторичных данных исследования (концентрации, подвижности и эффективной массы носителей тока, ширины запрещенной зоны, диэлектрической и магнитной проницаемости и т.д.).

3. Сопоставление результатов измерения с данными, полученными на одном и том же веществе ранее, их статистическая обработка, хранение полученной информации, построение кривых старения и т.д.

4. Сравнение полученных результатов с данными других исследователей, их критическая оценка (построение графиков по соответствующим параметрам, таблиц и т.п.).

5. Сравнение результатов опыта с существующими теориями и гипотезами и определение их обоснованности.

6. Составление единой классификации полупроводниковых материалов; разбивка их на группы, объединенные общими признаками и совокупностью важных для данной группы параметров (например, фотоэлектрических, диэлектрических, термоэлектрических, ферромагнитных и т.п.); определение по окончании опыта к какой группе классификации относится исследуемый неизученный материал и перспективность его дальнейшего исследования.

Следует отметить, что изложенные здесь соображения могут быть также применены (как по методам измерения, так и по способу их осуществления) для определения характеристик не только объемных монокристаллических и пленочных веществ, но и для дисперсных материалов (например, полупроводниковых порошков, сыпучих грунтов и минералов, и т.п.).

Литература

1. А.Ф. Иоффе. Физика полупроводников, Изд-во АН СССР, 1958.
2. Л.С.Стильбанс. Полупроводники в науке и технике. Сб. статей, Изд-во АН СССР, 1957.
3. В.П. Жузе, С.Н. Николаев. Метод измерения эффекта Холла в полупроводниках. ЖТФ, 5, 1953.
4. Е.Д. Девяткова, А.В. Петров, М.А. Смирнов, Б.Я. Мойжес. Плавленный кварц как образцовый материал для измерения теплопроводности. ФТТ, № 4, 1960.
5. Т.С. Нарман. J. Appl. Phys. N 8, 1959.
6. E. Putley. The Hall effect and related Phenomena London, 1960.
7. О.В. Емельяненко, Н.В. Гришин. Прибор для исследования кинетических эффектов в полупроводниках. ПТЭ, 1, 1960.
8. С.В. Айрапетянц. Измерение термоэлектрических свойств полупроводников по методу Хармана при высоких температурах. Термоэлектрические свойства полупроводников. Сб. трудов, Изд-во АН СССР, 1963.
9. И.С. Лискер. Нестационарные методы измерения термоэлектрических характеристик полупроводниковых материалов. ИФЖ, 3, 1962.
10. И.С. Лискер. Измерение коэффициента теплопроводности полупроводников в нестационарном режиме. Тепло-массообмен. Сб. трудов. Из-во АН БССР, Минск, 1962.
11. И.С. Лискер. Динамический метод определения температурного хода электропроводности полупроводников. Сб. трудов. Изд-во АН СССР, 1963.
12. Э.В. Евреинов, Ю.Г. Косарев. О системах автоматизации научных экспериментов для разработки вычислительных систем (данный сборник).