

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОВЫХ И ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве методических указаний (электронный ресурс)

САМАРА
Издательство СГАУ
2015

УДК 621.3 (075)

ББК 32.85я7

Составители: *Е.В. Бурнаевская, В.Н. Гришанов, И.Р. Нигматулин*

Рецензент канд. техн. наук, доц. В. А. Г л а з у н о в

Исследование световых и вольт-амперных характеристик фоторезисторов [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания / *сост.: Е. В. Бурнаевская, В. Н. Гришанов, И.Р. Нигматулин.* – Электрон. текстовые и граф. данные (0,75 Мб). – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Приведены краткие сведения о фоторезисторах, используемых в лазерных системах, их конструктивном исполнении. Основным содержанием указаний является методика исследования световых и вольт-амперных характеристик фоторезисторов и расчёта их параметров по экспериментальным данным.

Предназначены для использования при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Приёмники лазерного излучения», «Источники питания лазеров», «Лазерные измерения» со студентами, обучающимися по направлениям 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии и 12.04.04 Биотехнические системы и технологии. Могут быть полезны при курсовом и дипломном проектировании.

Подготовлены на кафедре лазерных и биотехнических систем.

УДК 621.3 (075)

ББК 32.85я7

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Параметры и характеристики фоторезисторов	8
2. Материалы, конструктивное исполнение и параметры промышленных фоторезисторов	12
3. Области применения фоторезисторов	16
4. Методика выполнения экспериментов.....	18
Контрольные вопросы.....	26
Задания	27
Список библиографических источников	28

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к лабораторной работе составлены в соответствии с рабочими программами дисциплин «Приёмники лазерного излучения», «Источники питания лазеров», «Лазерные измерения». Они содержат краткие теоретические сведения, необходимые для правильного понимания физической сущности исследуемых явлений и предназначены для оказания помощи студентам в подготовке к лабораторным занятиям, а также при оформлении и защите отчетов по выполненным работам.

После выполнения лабораторной работы студент представляет индивидуальный отчет, который должен содержать:

- титульный лист;
- цель и задачи лабораторной работы;
- схему установки;
- краткие сведения по теории;
- таблицы и графики расчетных и экспериментальных данных;
- выводы и заключения по работе.

Цель настоящей работы – освоение методов экспериментального исследования основных параметров и характеристик фоторезистора в различных режимах работы.

Фоторезистор (ФР) – это фотоприемник, принцип действия которого основан на эффекте фотопроводимости – свойстве вещества изменять свою электропроводность под действием оптического излучения вследствие внутреннего фотоэффекта.

Внутренним фотоэффектом называют процесс взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия квантов излучения передается электронам вещества, изменяющим в нем свое энергетическое состояние. Так как почти во всех случаях в качестве фоточувствительного материала приёмников оптического излучения (ПОИ) используют полупроводник, рассмотрим внутренний фотоэффект в нем с точки зрения зонной теории (ЗТ) и с позиций квантовой механики.

Согласно ЗТ, энергия электрона в полупроводнике может изменяться в некоторых интервалах почти непрерывно, но одновременно существуют интервалы значений энергии, которые электрон может преодолеть только скачком. Таким образом, вводится понятие о разрешенных и запрещенных зонах энергии в полупроводнике, наглядно представляемых энергетическими схемами, причем границы различных зон обозначают горизонтальными линиями (рис. 1).

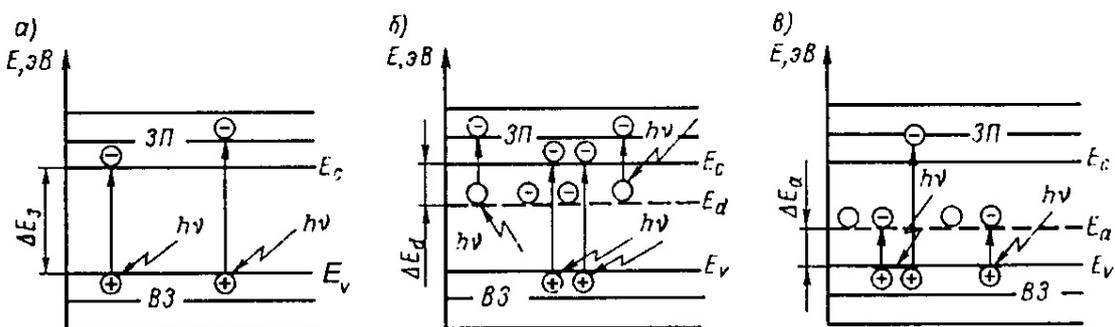


Рис. 1. Энергетические диаграммы собственного (а), донорного *n*-типа (б) и акцепторного *p*-типа (в) полупроводников

Возможные значения энергии электронов, которые могут перемещаться в пределах кристалла, образуют разрешенную зону, которую называют свободной, или зоной проводимости (ЗП). Здесь E_c – минимальная энергия, которую может иметь электрон в зоне проводимости. Величина E_v является максимальной энергией электронов в полностью заполненной зоне с завершёнными связями. Ниже E_v лежит спектр энергий всех связанных валентных электронов, и эту разрешенную зону называют валентной зоной (ВЗ).

Для того чтобы перевести электрон из связанного состояния в свободное, у чистого, т.е. собственного полупроводника (рис. 1, а), падающие кванты должны сообщить ему энергию больше, чем $\Delta E_z = E_c - E_v$, где ΔE_z – ширина запрещенной зоны полупроводника, определяемая природой его химических связей и температурой. При температуре 295 К для CdS $\Delta E_z = 0,63$ эВ; для Si $\Delta E_z = 1,12$ эВ; для Ge $\Delta E_z = 0,67$ эВ; для PbS $\Delta E_z = 0,42$ эВ; при температуре 195 К для PbSe $\Delta E_z = 0,23$ эВ; для InAs $\Delta E_z = 0,39$ эВ; при температуре 77 К для InSb $\Delta E_z = 0,23$ эВ, а для $Hg_{0,8}Cd_{0,2}$ $\Delta E_z = 0,1$ эВ.

Разрыв парноэлектронной связи в энергетической диаграмме для собственного полупроводника равнозначен переводу электрона из ВЗ в ЗП, в результате чего появляются свободные дырки в ВЗ, т. е. возникает электронно-дырочная собственная фотопроводимость – свойство вещества изменять свою электропроводность под действием оптического излучения. При введении в собственный полупроводник примесей, в запрещенной зоне полупроводника появляются дополнительные разрешенные уровни (рис. 1, б, в). Примесь, отдающую электроны в ЗП под действием падающих квантов излучения, называют донорной, а полупроводник – электронным или *n*-типа, в нем основную роль в примесной фотопроводимости играют электроны (рис. 1, б). Примесь, захватывающую электроны из ВЗ под действием падающих квантов излучения, называют акцепторной, а полупроводник – дырочным, или *p*-типа, в нем основную роль в примесной фотопроводимости играют дырки (рис. 1, в).

Собственная фотопроводимость может возникнуть у собственного полупроводника, если падающий квант сообщает электрону в ВЗ достаточную энергию для преодоления запрещенной зоны

$$h\nu = hc/\lambda \geq \Delta E_z, \quad (1)$$

откуда длинноволновая граница спектральной чувствительности фотоприемника

$$\lambda'' = hc/\Delta E_z \quad (\lambda'' [\text{мкм}] = 1,242/\Delta E_z [\text{эВ}]), \quad (2)$$

где λ'' – предельная длина волны монохроматического излучения, при котором возникает внутренний фотоэффект (красная граница фотоэффекта) при ΔE_z ; h – постоянная Планка; c – скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме. В скобках приведено выражение, позволяющее оценить значение красной границы в микрометрах, если ширину запрещённой зоны подставлять в электрон-вольтах.

Для определения длинноволновой границы спектральной чувствительности примесных фотоприемников в выражение (2) вместо ΔE_z подставляют ΔE_a или ΔE_d . Однако необходимо отметить, что энергия активации многих примесей в полупроводнике меньше средней энергии тепловых колебаний кристаллической решетки полупроводника при комнатной температуре (0,026 эВ), поэтому примесные атомы уже при комнатной температуре ионизированы и существует высокая проводимость полупроводника. Для устранения этого явления полупроводник приходится охлаждать.

1. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Фоторезисторы (ФР) изготавливают из полупроводников с собственной фотопроводимостью, обусловленной генерацией пар: электрон проводимости – дырка проводимости; и с примесной фотопроводимостью, обусловленной ионизацией атомов донорной или акцепторной примесей, возникающей под действием оптического излучения. ФР неполярны и одинаково проводят электрический ток в любом направлении, что позволяет включать их в цепи постоянного и переменного тока.

Наибольшее распространение получили ФР с собственной фотопроводимостью, так как они предназначены для работы в видимой, УФ и ближней ИК областях спектра и не требуют охлаждения. Пути увеличения фотопроводимости ФР при поглощении потока излучения следующие (рис. 1.1):

- переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости (увеличивается собственная проводимость, рис. 1.1, а);
- переходы электронов с примесных донорных уровней в запрещенной зоне в зону проводимости (увеличивается электронная проводимость, рис. 1.1, б);
- переходы электронов из валентной зоны на акцепторный уровень (увеличивается дырочная проводимость, рис. 1.1, в).

Световой характеристикой ФР, предназначенных для работы в видимой области спектра, называется зависимость его сопротивления от светового потока $R(\Phi)$ или освещенности $R(E)$. Последняя ещё называется люкс-омической характеристикой. Если фоторезистор предназначен для работы вне видимого диапазона и/или параметры излучения представлены в энергетической системе единиц, то под световой характеристикой подразумевается зависимость сопро-

тивления фоторезистора от потока излучения или энергетической освещенности. Световая характеристика, как правило, нелинейна (рис. 1.2). Характер её изменения зависит в сильной степени от примесей. При больших освещенностях увеличение фототока отстает от роста светового потока, намечается тенденция к насыщению. Это объясняется тем, что, при увеличении светового потока наряду с ростом концентрации генерируемых носителей заряда, растет вероятность их рекомбинации.

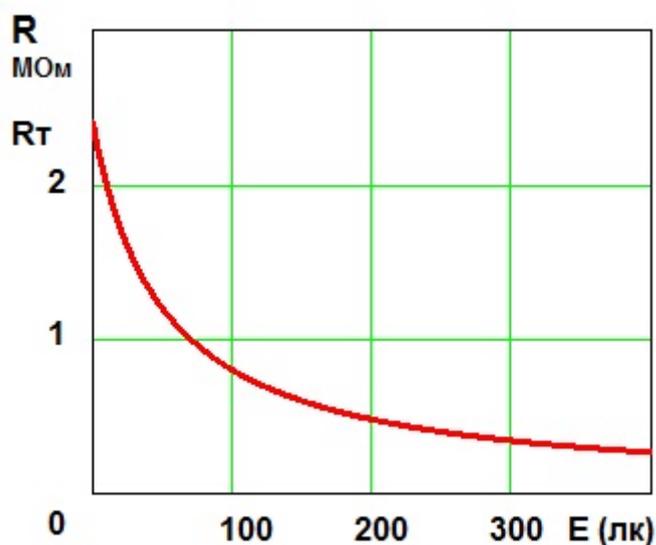


Рис. 1.2. Люкс-омическая характеристика фоторезистора

На рис. 1.2 – R_T – **темновое сопротивление** – сопротивление фоторезистора в отсутствие падающего на него потока излучения в диапазоне его спектральной чувствительности. Это важный параметр ФР, который почти всегда присутствует в технической документации и справочниках. В зависимости от типа ФР темновое сопротивление имеет величину порядка $10^4 - 10^7$ Ом.

При слабом освещении нелинейность люкс-омической характеристики объясняется захватом фотоносителей центрами прилипания, рекомбинации, ловушками, создаваемыми дефектами кристаллической решетки, атомами посторонних примесей.

Другим важным параметром ФР является **кратность изменения сопротивления** K_R – отношение темнового сопротивления фоторезистора к сопротивлению при определенном уровне освещенности (световому сопротивлению). Этот параметр позволяет проектировать релейные устройства автоматики с использованием ФР, а также качественно оценить пригодность фоторезистора для измерений освещенности.

Чувствительность ФР иногда характеризуют относительным изменением его сопротивления S_R , не зависящим от схемы включения:

$$S_R = \Delta R_\phi / (R_\phi \Delta \Phi), \quad (3)$$

где R_ϕ – сопротивление фоторезистора при потоке Φ ; ΔR_ϕ – изменение сопротивления ФР при приращении потока на $\Delta \Phi$. Измеряется чувствительность S_R в 1/Вт.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фоторезистора – это зависимость тока фоторезистора от величины приложенного напряжения при фиксированном значении воздействующего светового потока Φ . Обычно рассматривают семейство ВАХ при различных величинах Φ . Пример семейства ВАХ приведен на рис. 1.3. Цифровые значения токов и световых потоков, приведенные на рис. 1.3, следует рассматривать как ориентировочные и дающие представления о порядке величин.

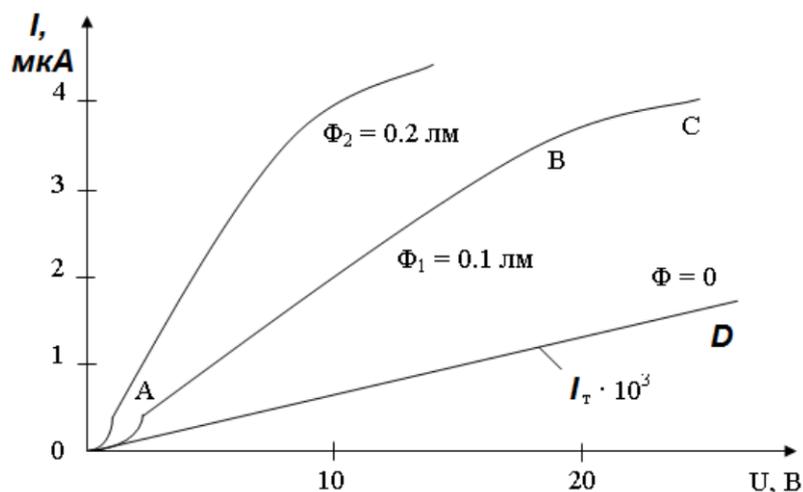


Рис. 1.3. Вольт-амперная характеристика фоторезистора

Темновая ВАХ фоторезистора (OD) линейна, для наглядности на рис. 1.3 величина темнового тока увеличена в 10^3 раз. Типовая ВАХ (например, при $\Phi_1 = 0,1$ лм) в общем случае состоит из трех участков:

– АВ – рабочий, линейный участок;

– ОА – обычно нелинейный, квадратичный из-за заметного при малых токах и напряжениях действия потенциальных барьеров между полупроводниковым слоем и выводами, между отдельными зернами фоточувствительного слоя;

– ВС – загиб ВАХ при больших токах. Обусловлен разогревом фоточувствительного слоя, ростом концентрации носителей, скорости рекомбинации и, соответственно, уменьшением времени жизни носителей и коэффициента усиления М.

Коэффициент усиления фототока $M = \tau/t_{\text{пр}}$ возникает в ФР за счет многократного прохождения носителей через фоторезистор в случае, когда время жизни носителей τ много больше времени пролета $t_{\text{пр}}$ их через фоторезистор при приложении к нему разности потенциалов. Коэффициент усиления по току М может достигать величин $10^3 - 10^7$.

С вольт-амперной характеристикой ФР связаны такие параметры, как:

– **рабочее напряжение** U_p – постоянное напряжение, приложенное к фоторезистору, при котором обеспечиваются номинальные параметры при длительной его работе в заданных эксплуатационных условиях;

– **максимально допустимое напряжение фоторезистора** U_{max} – максимальное значение постоянного напряжения, приложенного к фоторезистору, при котором отклонение его параметров от номинальных значений не превышает указанных пределов при длительной работе в заданных эксплуатационных условиях;

– **допустимая мощность рассеяния** P_{max} – мощность, при которой не наступает необратимых изменений параметров фоторезистора в процессе его эксплуатации.

2. МАТЕРИАЛЫ, КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ И ПАРАМЕТРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

Как уже отмечалось, фоторезистор – это полупроводниковый приёмник излучения, действие которого основано на явлении фотопроводимости (фоторезистивный эффект). ФР могут выполняться как на основе объёмных, так и плёночных полупроводников. Схематично устройство фоторезистора представлено на рис. 2.1.

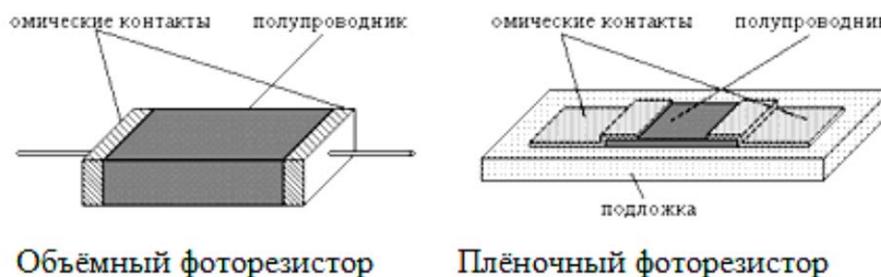


Рис. 2.1. Основные конструктивные элементы объёмных и плёночных фоторезисторов

Современные фотосопротивления производят на основе следующих полупроводниковых соединений: PbS, PbSe, PbTe, Bi₂S, Tl₂S, CdS, CdSe а также Si и Ge с примесями Au, Cu, Zn и других металлов. Для большинства полупроводников с собственной проводимостью ΔE_z равно примерно 1...2 эВ, чему соответствуют значения длины волны красной границы $\lambda'' \approx 1,2...0,6$ мкм. У примесных полупроводников энергии активации существенно меньше. Например, у чистого кремния (Si) $\Delta E_z = 1,05$ эВ, а при наличии примесей Al, Ga, P величина энергии активации (ΔE_a или ΔE_d), соответственно, снижается до 0,067; 0,071; 0,046 эВ. Благодаря такой малой энергии активации примесные полупроводни-

ки пригодны для регистрации инфракрасного излучения с длиной волны вплоть до 5-6 мкм, а с помощью специальных разработок и в более длинноволновой области спектра.

Конструкции неохлаждаемых ФР отличаются большим разнообразием. Несколько вариантов конструктивного исполнения ФР приведены на рис. 2.2. Из него видно, что в большинстве случаев объёмные или плёночные элементы размещены внутри корпуса, имеющего прозрачное окно.

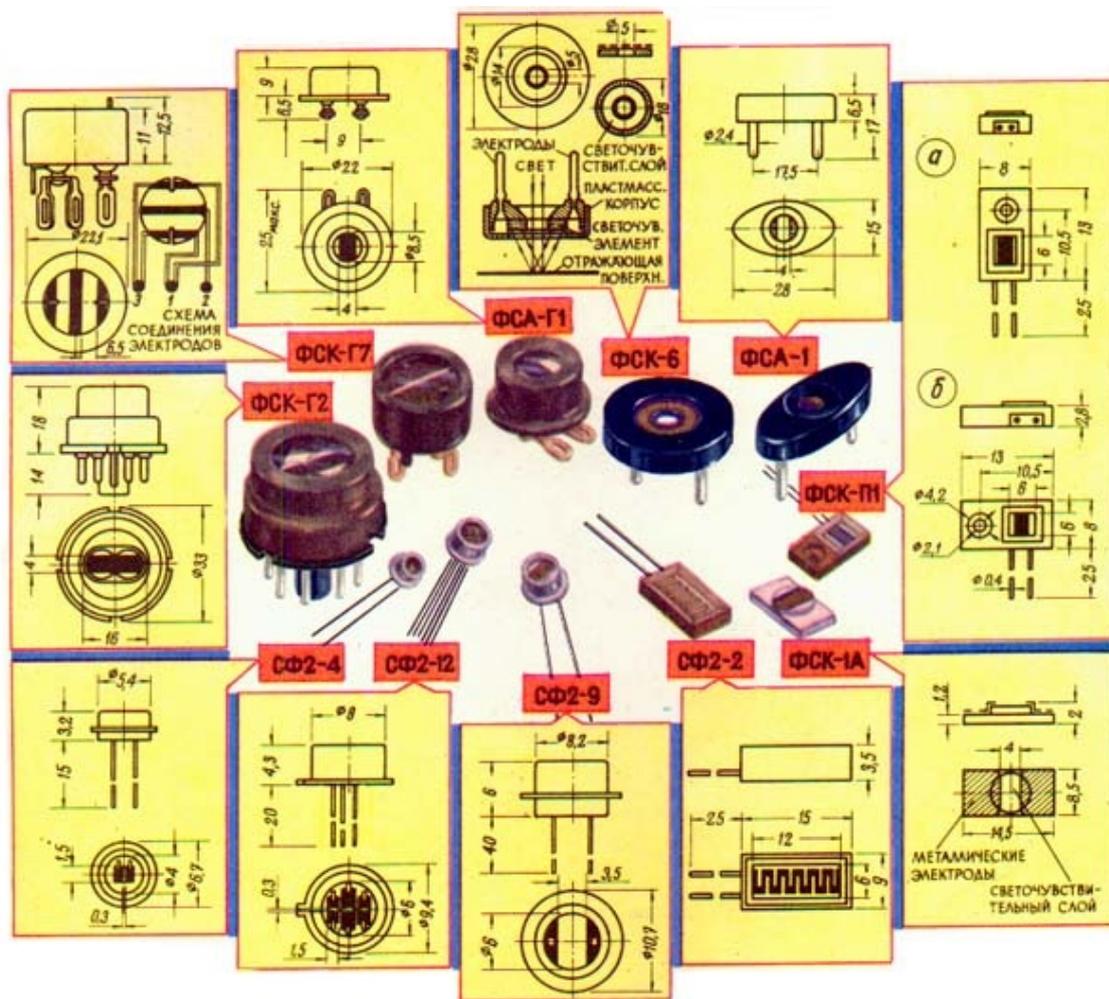


Рис. 2.2. Конструкции фоторезисторов

Для изготовления ФР применяют различные технологические приёмы, наиболее простые из которых описаны ниже. Фоточувствительный слой ФР из CdS и CdSe наносят на стеклянную или керамическую подложку пульверизаци-

ей, реже испарением в вакууме и спеканием порошкообразной массы. ФР на основе PbS и PbSe изготавливают путем химического осаждения фоторезистивного слоя на подложку из стекла или кварца. Электроды в виде пленок из золота, платины или серебра, наносятся испарением в вакууме. Для защиты резистивного слоя от действия атмосферы, его покрывают лаком или заделывают в герметический корпус.

Высока надёжность и стабильность комплекса параметров фоторезисторов в течение длительной эксплуатации, изменение параметров в течение 15 лет не превышает $-10 \sim +20$ %. Высока стабильность параметров при термоударах. Изменение параметров при комнатной температуре ($+22^{\circ}\text{C}$) после воздействия низких и высоких температур (термоциклов $-60 \sim +60^{\circ}\text{C}$) не превышает $\pm 2\%$ и $\pm 6\%$ соответственно. Изменение параметров фоторезисторов в зависимости от температуры характеризуется высокой повторяемостью при разных термоциклах. После сильного освещения (2000 лк от источника типа «А» – лампа накаливания при 2840 К) ухудшение чувствительности и увеличение темнового сопротивления не превышает 3-8% и быстро восстанавливается. Постоянная времени и чувствительность восстанавливаются по уровню 0,98 не более чем за 20 минут.

В табл. 2.1 представлены основные параметры фоторезисторов, выпускаемых промышленностью. За более полными данными следует обращаться к справочной литературе. Тут нужно иметь в виду, что найти требуемый для конкретной разработки набор справочных данных представляет собой не менее сложную задачу, чем сами оценки, которые предполагается сделать на их основе. Часто ситуация складывается таким образом, что выражения, используемые конструктором тривиальны и приведены почти во всех пособиях по оптико-электронным приборам, а вот параметры фоторезистора в справочниках приведены лишь в форме неравенств, кроме того, значения освещенности и температуры не всегда соответствуют эксплуатационным. Изложенные соображения являются дополнительными аргументами в пользу освоения методик экспериментального исследования, которые просто необходимы для решения конст-

рукторской задачи. Подобные проблемы возникают, когда разрабатываются устройства для новых областей или условий применения, например, условий космоса, наличия сильных магнитных или электрических полей. В табл. 2.1: $\Delta\lambda$ – область спектральной чувствительности; λ_{\max} – длина волны, соответствующая максимальной чувствительности; U_p – рабочее напряжение; I_T – темновой ток; I_{cv} – ток при освещении; R_{cv} – световое сопротивление при определённом уровне освещённости.

Таблица 2.1

Параметры некоторых фоторезисторов, выпускаемых промышленностью

Тип	ФСК-1	СФ3-1	ФСА-4	СФ4-2Д
Материал	CdS	CdSe	PbS	PbSe
Размеры фоточувствительного элемента, мм	4×7,2	0,5×1,5	4×6	2×2
$\Delta\lambda$, мкм	0,2...0,9	0,55...0,85	0,3...3,0	0,5...4,6
λ_{\max} , мкм	0,6...0,64	0,75...0,82	2,0...2,2	3,5...3,7
U_p , не более, В	50	15	40	5
R_T , не менее, МОм	3,3	30	0,04	0,2
I_T , не более, мкА	15	0,5		
I_{cv} (при $E=200$ лк), не менее, мА	15	0,75		
R_T / R_{cv} , не менее, отн. ед.	100	1500	1,2	
P_{max} , не более, мВт	125	10	10	10

3. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТОРОВ

В настоящее время нет ни одной отрасли науки и техники, где не применялись бы ФР. В табл. 2.1 приведены параметры отечественных ФР, широко используемых в тепловизорах, радиометрах, тепlopеленгаторах, в системах автоматизации в приборах спектрального анализа, в системах световой сигнализации и защиты. ФР применяют в системах контроля и измерения геометрических размеров, скоростей движения объектов, температуры, управления различными механизмами, для определения качественного и количественного состава твердых, жидких и газообразных сред и т.д. ФР сегодня – один из самых распространенных фотоприемников, так как во многих случаях фоторезистивный способ получения и обработки информации дает явное преимущество по сравнению с другими способами. Благодаря значительному усовершенствованию конструкций и расширению номенклатуры серийно выпускаемых фоторезисторов, стало возможным дальнейшее развитие фоторезистивной автоматики.

Из конкретных применений можно указать следующие:

- пожарные датчики открытого пламени диапазона 1,0...3,3 мкм, датчики для обнаружения дыма, промышленные и квартирные, с очень высокой помехоустойчивостью к оптическим и электромагнитным помехам;
- датчики контроля непрерывности и качества горения газовых факелов промышленных котлов, крупных энергетических и технологических установок;
- датчики пересечения невидимого ИК-луча, активные, для охранной сигнализации и промышленности с очень высокой помехоустойчивостью к оптическим помехам;

– датчики для обнаружения и приборы для измерения длины металлического проката на скоростях до 10 м/сек с точностью 0,05 м при длине до 12 м с использованием собственного излучения нагретого до температуры 300-800°С проката;

– фотоприёмные устройства для приборов, измеряющих концентрацию сахара в жидкостях, и измеряющих влажность по отраженному свету от поверхности объектов.

4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальное исследование световой и вольт-амперной характеристик ФР кроме самого объекта – ФР требует источника излучения, приборов контроля его световых и электрических параметров, многопредельных амперметра и вольтметра, двух регулируемых, а лучше и стабилизированных источников электропитания. Для исключения влияния фоновых засветок ФР и источник излучения должны быть размещены внутри светонепроницаемого кожуха. Металлический кожух гарантирует светонепроницаемость во всём оптическом диапазоне спектра электромагнитного излучения.

В последующих рассуждениях будем исходить, что объект исследования представляет собой серийный фоторезистор из сульфида или селенида кадмия. Ориентируясь на табл. 2.1, определяем, что для электроцепей фотоприёмника потребуется многопредельный амперметр с диапазоном перекрытия измеряемых токов от долей микроампера до десятков миллиампер и многопредельный вольтметр постоянного тока с верхним пределом 50...100 В. Регулируемый источник питания цепей ФР должен иметь регулировку выходного напряжения в пределах $0 \dots U_{\max}$, т.е. прежде чем приступить к выполнению эксперимента следует по справочным данным или у преподавателя установить значение U_{\max} для исследуемого ФР. Учитывая, что токи, протекающие через ФР невелики, то в отсутствие регулируемого в нужных пределах источника питания, как вариант, допустимо применение потенциометра.

Поскольку одноцветные светодиоды отличаются долговременной стабильностью параметров, в качестве источника излучения видимого диапазона оптимально использовать светодиод. Поток его излучения допустимо измерять

как в энергетической системе единиц подходящим оптическим ваттметром, так и в световой – люксметром; контролируемым электрическим параметром, определяющим поток излучения, является сила тока. Поток излучения светодиода легко регулируется величиной протекающего тока. Требуемый диапазон регулирования и контроля от нуля до нескольких десятков миллиампер. Максимальное напряжение источника питания светодиода при экспериментах не должно превышать десяти вольт.

Учитывая требуемые диапазоны измерения электрических параметров, как фоторезистора, так и светодиода, в качестве электроизмерительных приборов удобно использовать современные портативные цифровые мультиметры.

Мультиметр – это прибор, который способен измерять несколько величин, каждую в нескольких поддиапазонах. Цифровой мультиметр – это электронный прибор с цифровым отсчётом показаний. Выбор измеряемой величины и поддиапазона её измерения в большинстве случаев осуществляется поворотом всего одного переключателя.

К наиболее простым, а потому доступным по цене мультиметрам относится модель M830B (рис. 4.1). Этот инструмент – один из серии карманных 3,5-разрядных цифровых мультиметров для измерения постоянного, переменного напряжения, постоянного тока, сопротивлений, проверки диодов и транзисторов. Он имеет один *переключатель функций и диапазонов*. Этот переключатель используется как для выбора функций и желаемого предела измерений, так и для выключения прибора. Для продления срока службы батареи переключатель должен быть в положении «OFF» когда прибор не используется. Дисплей 3,5-разрядный 7-сегментный жидкокристаллический, высотой 12,7 мм. Разъем «COMMON» (общий). Разъем для черного (отрицательного) провода-щупа. Разъем «V, Ω, mA». Разъем для красного (положительного) провода-щупа для измерения всех напряжений, сопротивлений и токов (кроме 10 А). Разъем «10A». Разъем для красного (положительного) провода-щупа для измерения токов в диапазоне до 10 А. По сути, этот переключатель – единственный орган

управления мультиметром, совмещающий в себе и функции выключателя питания прибора.

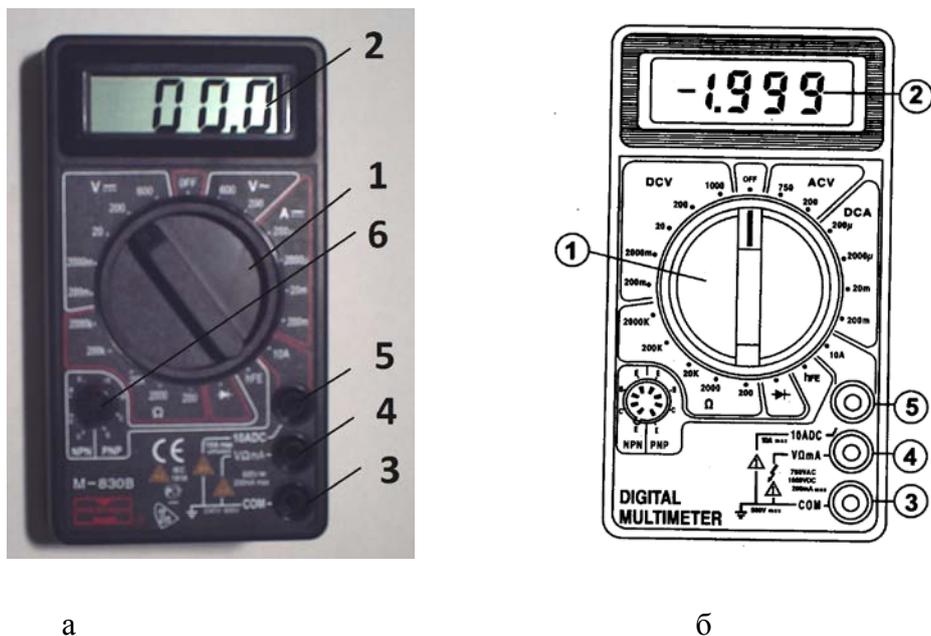


Рис. 4.1. Мультиметр М830В: *а* – внешний вид; *б* – эскиз; 1 – переключатель функций и диапазонов; 2 – жидкокристаллический дисплей; 3 – разъём «COMMON»; 4 – разъем «V,Ω,mA»; 5 – разъем «10А»; 6 – разъем для проверки транзисторов

Технические параметры мультиметра гарантируются на срок не менее 1 года при температуре $23 \pm 5^\circ\text{C}$ и относительной влажности не более 75% и приведены в табл. 4.1–4.4 (*D* – значение младшего разряда на данном диапазоне измерений). Прибор производит 2 измерения в секунду.

Таблица 4.1

Параметры мультиметров при измерениях постоянного напряжения

ДИАПАЗОН	РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ	ПОГРЕШНОСТЬ при 18...28°C
200 мВ	100 мкВ	$\pm 0,25\% \pm 2D$
2 В	1 мВ	$\pm 0.5\% \pm 2D$
20 В	10 мВ	
200 В	0,1 В	
1000 В	1 В	

Защита от перегрузок: 200 В эффективного значения для диапазона 200 мВ и 1000 В или 750 В эффективного значения для других пределов.

Таблица 4.2

Параметры мультиметров при измерениях переменного напряжения

ДИАПАЗОН	РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ	ПОГРЕШНОСТЬ при 18...28°C
200 В	0,1 В	±1,2% ±10 D
750 В	1 В	

Защита от перегрузок 1000 В или 750 В эффективного значения для всех диапазонов. Корректно измеряется среднеквадратичное значение переменного напряжения синусоидальной формы. Диапазон рабочих частот: 45 – 450 Гц. Входное сопротивление при измерении напряжений как постоянного, так и переменного тока составляет 1 МОм.

Таблица 4.3

Параметры мультиметров при измерениях постоянного тока

ДИАПАЗОН	РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ	ТОЧНОСТЬ при 18 ÷ 28°C
200 мкА	100 нА	± 1,0% ± 2D
2000 мкА	1 мкА	
20 mA	10 мкА	
200 mA	100 мкА	± 1,2% ± 2D
10 A	10 mA	± 2,0% ± 2D

Защита от перегрузки – предохранитель 200 мА/250 В. Падение напряжения при измерении 200 мВ при максимальном на выбранном пределе токе.

Параметры мультиметров при измерениях электрического сопротивления

ДИАПАЗОН	РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ	ТОЧНОСТЬ 18°C ÷ 28°C
200 Ом	0,1 Ом	± 0,8% ± 2D
2 кОм	1 Ом	
20 кОм	10 Ом	
200 кОм	100 Ом	
2000 кОм	1 кОм	± 1,0% ± 2D

Напряжение холостого хода при измерении сопротивлений ~ 2,8 В.

При изменении напряжений и токов мультиметром надо соблюдать осторожность, чтобы не испортить прибор: *сначала* установите переключатель мультиметра в нужное положение и только *потом* подключайте его. Если сделать наоборот, то можно сразу испортить прибор. Пусть, например, надо измерить напряжение. Если сначала подключить прибор к источнику напряжения, а потом поворачивать переключатель, то можно при этом пройти через поддиапазоны измерения тока. Через прибор пройдет большой ток, и прибор будет испорчен. Если требуемый поддиапазон измерения заранее неясен, установите переключатель на поддиапазон с *наибольшим пределом измерения*, а потом переключайте его на меньшие и остановитесь на оптимальном (в плане минимизации погрешности измерений или охвата требуемого диапазона изменений измеряемой величины).

При проведении измерений в устройствах, имеющих в своём составе генераторы импульсов, например, в импульсных блоках питания, всегда помните, что там могут присутствовать высоковольтные импульсы напряжения, которые могут вывести прибор из строя, т.е. при выборе предела измерения нужно ориентироваться на амплитуду импульса, а не на среднее или эффективное значение измеряемой величины. Никогда не проводите измерение величины сопротивлений во включенных схемах.

Таким образом, структурная схема установки для исследования световых и вольт-амперных характеристик ФР (рис. 4.2) состоит из фоторезистора с приборами электропитания и измерения токов и напряжений, светодиода с источником питания и миллиамперметром, оптического ваттметра или люксметра, причём ФР, измерительный преобразователь ваттметра или люксметра и светодиод размещаются внутри светонепроницаемого кожуха. Стрелка на рис. 4.2 означает возможность замещения фоторезистора измерительным преобразователем и наоборот.

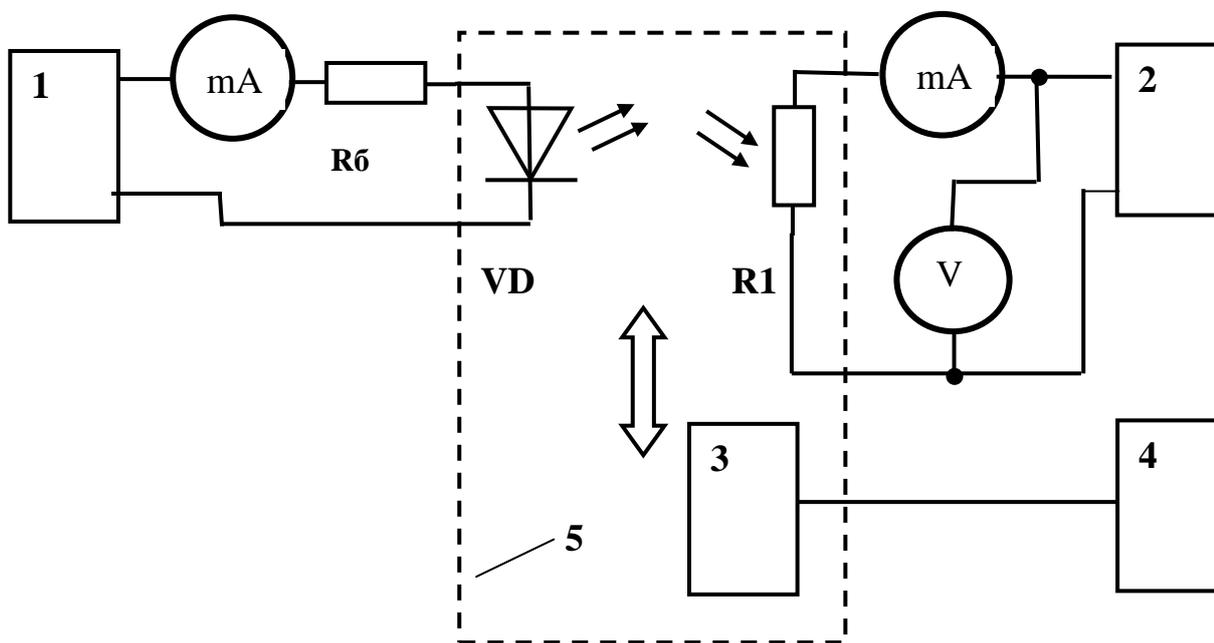


Рис. 4.2. Структурная схема установки для исследования световых и вольт-амперных характеристик фоторезисторов: 1, 2 – регулируемые источники питания; 3 – приёмный преобразователь ваттметра или люксметра; 4 – регистрирующее устройство ваттметра или люксметра; 5 – светонепроницаемый кожух; mA и V – мультиметры

Измерения проводятся в следующей последовательности:

1) собирается схема в соответствии с рис. 4.2. При этом фотоприёмником служит измерительный преобразователь оптического ваттметра или люксметра, т.е. производится калибровка источника излучения. На первом этапе снимается энергетическая или световая характеристики источника излучения – зависимость потока излучения или освещённости от тока светодиода. При использо-

вании ваттметра необходимо зафиксировать в исходных данных эффективные размеры фоточувствительной площадки измерительного преобразователя, т.к. наиболее вероятна ситуация, когда измерительный преобразователь ваттметра будет перехватывать лишь небольшую долю поперечного сечения пучка. Кроме того, нужно либо отметить положение в пространстве, где была расположена фоточувствительная площадка измерительного преобразователя, либо конструктивно обеспечить последующую фиксацию фоточувствительной площадки исследуемого фоторезистора в положении, где располагалась фоточувствительная площадка измерительного преобразователя;

2) на место измерительного преобразователя устанавливается исследуемый фоторезистор и проводятся измерения его световых и вольт-амперных характеристик по заданию преподавателя. Если при установке ФР изменилось расстояние между светодиодом и фоточувствительной площадкой ФР по сравнению с предыдущим экспериментом, то необходимо сделать перерасчёт освещённости или потока излучения, пользуясь законом обратных квадратов;

3) обрабатываются полученные результаты и готовится отчёт об экспериментальных исследованиях в соответствии с разделом ЗАДАНИЯ настоящих методических указаний и дополнительными задачами, поставленными преподавателем.

В лабораторной работе исследуются ВАХ ФР. При этом возможны два варианта включения амперметра и вольтметра для этой цели (рис. 4.3). Здесь следует объективно решить вопрос о предпочтительности варианта рис. 4.3, *а* или рис. 4.3, *б* с точки зрения влияния тока, протекающего через вольтметр V , на оценку искомого тока нагрузки I_R по показаниям миллиамперметра mA в варианте рис. 4.3, *а* или влияния падения напряжения на миллиамперметре mA на оценку искомого напряжения на нагрузке U_R по показаниям вольтметра V в варианте рис. 4.3, *б*.

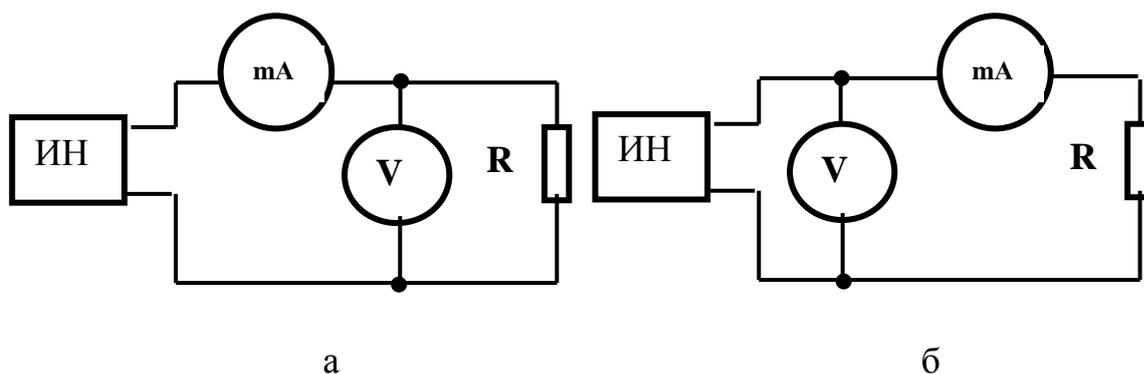


Рис. 4.3. Варианты включения мультиметров при измерении вольт-амперных характеристик нагрузок: ИН – источник регулируемого напряжения; mA – миллиамперметр; V – вольтметр; R – нагрузка

Путём расчёта погрешности метода и предварительных результатов следует обосновано отдать предпочтение одному из вариантов и внести, если необходимо, поправки в экспериментальные результаты, учитывающие параметры используемых приборов и схему их включения.

Современные регулируемые источники питания имеют в своём конструктиве приборы, измеряющие выходное напряжение и ток. Если параметры этих приборов удовлетворяют условиям эксперимента, то внешние мультиметры использовать нецелесообразно. Прогнозируется допустимость такого упрощения для измерения тока светодиода и напряжения на последовательно включённых миллиамперметре и фоторезисторе.

В принципе, снять люкс-омическую характеристику фоторезистора можно используя омметр или мультиметр в режиме измерения сопротивления. Однако в этом случае нет определённости в напряжении на фоторезисторе, при котором проводились измерения, т.е. не определена точка вольт-амперной характеристики.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните механизмы собственной и примесной проводимости в полупроводниках с точки зрения зонной теории.
2. Что такое «темновая» электропроводность полупроводника?
3. Что называется фотопроводимостью?
4. Что такое внутренний фотоэффект в полупроводниках?
5. Как образуются избыточные носители заряда в полупроводниках под действием квантов света?
6. Укажите возможные типы переходов электронов при поглощении квантов света.
7. Как связана критическая длина волны с характеристиками полупроводника при собственной и примесной фотопроводимости?
8. Что такое квантовый выход внутреннего фотоэффекта?
9. Объясните характер зависимости фототока от светового потока, падающего на фоторезисторы.
10. Как и почему изменяется электропроводность полупроводников в зависимости от длины волны, падающего излучения?
11. Перечислите основные характеристики и параметры фоторезисторов.
12. Перечислите основные достоинства и недостатки фоторезисторов.
13. Каковы конструктивные особенности и основные рабочие характеристики фоторезисторов?
14. Опишите область применения фоторезисторов.
15. Какие параметры полупроводникового материала важны для работы фоторезистора?

ЗАДАНИЯ

1. Сделать эскиз экспериментальной установки с указанием основных размеров и расстояний.
2. Привести принципиальную схему, с помощью которой проводились измерения.
3. Составить таблицу использованного в экспериментах оборудования, приборов и элементов.
4. Рассчитать погрешности методов проводимых экспериментов.
5. Осуществить, если требуется, энергетическую или световую градуировку используемого источника излучения.
6. Провести измерения световой или энергетической характеристики фоторезистора и представить результаты в табличной и графической формах.
7. Провести измерения вольт-амперной характеристики фоторезистора и представить результаты в табличной и графической формах.
8. По индивидуальному заданию преподавателя рассчитать параметры фоторезистора.
9. Дать анализ полученных результатов.

СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. – СПб.: Папирус, 2003. – 527 с.
2. Источники и приемники излучения / Г.Г. Ишанин, Э.Д. Панков, А.Л. Андреев, Г.В. Польщиков. – СПб.: Политехника, 1991. – 240 с.
3. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приёмники оптического излучения. Справочник. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.
4. ГОСТ 21934-83. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения. – М.: Из-во стандартов, 1983. – 42 с.
5. Александровский А.С., Им С.Т. Техника оптических измерений. – Красноярск: Из-во Сибирского Федерального Университета 2007. – 129 с.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОВЫХ И ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОРЕЗИСТОРОВ**

Электронные методические указания

Составители:

*Бурнаевская Екатерина Владимировна,
Гришанов Владимир Николаевич
Нигматулин Ильнур Русланович*

Редактор И.И. Спиридонова
Довёрстка И.И. Спиридонова

Арт. 52/2015.

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во СГАУ 443086 Самара, Московское шоссе, 34.