

УДК 537.311.322:378.147.091.313

**МЕТОДИКА ПОСТАНОВКИ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО
ИЗУЧЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ****Т. М. Ткаченко,***кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры практиче-
ской подготовки студентов БГАТУ;***С. М. Барайшук,***кандидат физико-математических наук,
доцент, заведующий кафедрой практи-
ческой подготовки студентов БГАТУ***А. П. Михальцов,***кандидат технических наук,
«НТЦ “Дидактика”»;***М. В. Янко,***ассистент кафедры
практической подготовки
студентов БГАТУ*

Поступила в редакцию 23.04.18.

Описывается методика постановки и проведения лабораторной работы по дисциплине «Электротехнические и конструкционные материалы» с использованием универсального электроагрегатного комплекса отечественного производства. Лабораторная работа посвящена изучению зависимости свойств полупроводниковых материалов от освещенности. Работа интегрирована в другие дисциплины, изучаемые студентами энергетических специальностей.

Ключевые слова: технический вуз, лабораторное занятие, материаловедение, универсальный стенд, междисциплинарные связи, профессиональные компетенции, подготовка инженеров.

The technique of statement and conducting of laboratory work on discipline "Electrotechnical and constructional materials" with the use of a universal electroassembly complex of domestic production is described. The laboratory work is devoted to the study of dependence of the properties of semiconductor materials on illumination. The work is integrated into other disciplines studied by students of energy specialties.

Keywords: technical university, laboratory practice, materials science, universal stand, interdisciplinary connections, professional competences, training of engineers.

Введение. В настоящее время разрабатываются образовательные стандарты следующего поколения, предполагающие значительное сокращение времени на обучение студентов энергетических специальностей технических вузов. В этой связи назрел вопрос пересмотра лабораторного практикума дисциплины «Электротехнические и конструкционные материалы» (ЭТКМ) в сторону интенсификации обучения и взаимосвязи с дисциплинами «Физика» (раздел «Электричество и магнетизм»), «Теоретиче-

UDC 537.311.322:378.147.091.313

**METHODS OF ARRANGEMENT OF
LABORATORY WORK ON STUDYING
THE DEPENDENCE OF ELECTRIC
CHARACTERISTICS OF
SEMICONDUCTING MATERIALS ON
ILLUMINATION****T. Tkachenko,***associate professor of the Department
of practical training of students, PhD,
Associate Professor, BSATU;***S. Barayshuk***PhD in Physics and Mathematics, Associate
Professor, Head of the Department of
Practical Training of Students, BSATU;***A. Mikhaltsou,***PhD in Technical Sciences,
STC “Didactics”;***M. Yanko,***Assistant of the Department
of Practical Training
of Students, BSATU*

Received on 23.04.18.

ские основы электротехники», «Монтаж и обслуживание электрооборудования» [1]. Междисциплинарная интеграция – важнейший фактор совершенствования процесса обучения. Особенно наглядно демонстрирует возможности такого взаимодействия дисциплин комплекс лабораторных работ по ЭТКМ. В процессе их выполнения студенты приобретают и теоретические знания, и практические навыки по нескольким дисциплинам одновременно. Лабораторный практикум направлен на выработку у студентов навыков работы с контрольно-измерительным обо-



Рисунок 1 – Внешний вид доработанного лабораторного стенда с оснащением для проведения работы «Зависимость электрических свойств полупроводников от освещенности»

рудованием, формирование умения самостоятельно вести исследования, соблюдать требования техники безопасности, анализировать, и способности сформулировать результаты и выводы о проделанной работе в виде краткого отчета. При самостоятельной подготовке к лабораторным работам по курсу «Электротехнические и конструкционные материалы» студенты могут использовать разработанный на кафедре практической подготовки студентов БГАТУ электронный учебно-методический комплекс [2].

При изучении свойств материалов студентами энергетических специальностей особое внимание уделяется поведению различных материалов в электрическом поле. В соответствии с ним, материалы классифицируют на проводники, полупроводники и диэлектрики, а основным параметром, отвечающим за электротехническую классификацию материалов, является проводимость (электропроводность). В технике чаще используют величину, обратную проводимости, – удельное электрическое сопротивление. Лабораторный практикум по курсу ЭТКМ обязательно включает в себя изучение этого параметра в основных классах материалов, в частности в полупроводниках. В наше время полупроводниковые материалы приобрели широчайшее использование во всей современной технике, в том числе в энергетике. Это связано с возможностью управлять сопротивлением (электропроводностью) полупроводников внешними воздействиями. Поэтому, наряду с ранее разработанной на

кафедре практической подготовки студентов работой по изучению влияния температуры на сопротивление полупроводников [3], представляется обоснованным расширить изучение полупроводников и полупроводниковых приборов на их базе в лабораторном практикуме, даже с учетом ограниченного времени на лабораторные занятия в целом. Неотъемлемой составляющей современной альтернативной энергетики являются полупроводниковые солнечные элементы, способные трансформировать световую энергию в электрическую. В технике активно применяются приборы с фоточувствительными элементами. В этой связи постановка лабораторной работы по изучению влияния освещенности на удельное электрическое сопротивление (проводимость) полупроводника является весьма актуальной.

Методика постановки лабораторной работы. Методика проведения лабораторной работы «Зависимость электрических свойств полупроводников от освещенности» разработана на основе анализа уже известных лабораторных работ по данной теме [4–5].

Основой для рабочей установки по изучению свойств полупроводников стал универсальный стенд «Электромонтажный комплекс» НТЦ –08.47.1 [6] (рисунок 1). Встроенный электрический модуль стенда был модернизирован производителем по техническому заданию кафедры для постановки всего цикла лабораторных работ по дисциплине «Электротехнические и конструкционные



Рисунок 2 – Энергетические спектры электронов в твердых телах в представлении в зонной теории

материалы». Вместо вентиляционного канала установлен автотрансформатор, вместо аналоговых приборов – модульные вольтметр, амперметр и ваттметр. На стенде также смонтированы: источник постоянного напряжения, диодный мост, многофункциональные цифровые мультиметры Mastech MY64.

Для проведения работы по изучению зависимости электрических свойств полупроводников от освещенности, студентам необходимо вспомнить основы квантовой механической зонной теории твердых тел. Для объяснения различий материалов по проводимости в зонной теории все материалы разделяют соответственно распределению их электронов по энергиям. Считается, что все связанные электроны в материале могут иметь только значения энергии из зоны валентности, а свободные электроны – из зоны проводимости. От того, есть ли между этими зонами зазор (запрещенная зона), зависит в целом, будет ли материал проводником, полупроводником или диэлектриком (рисунок 2).

Предположим теперь, что на полупроводник перпендикулярно его поверхности падает поток монохроматического света с частотой ν . Этот световой поток представляет собой поток фотонов, каждый из которых обладает энергией:

$$\varepsilon = h\nu, \quad (1)$$

Попадая в полупроводник, фотоны взаимодействуют с валентными электронами полупроводника и стремятся передать им свою энергию. Если энергия падающих фотонов превышает ширину запрещенной зоны ΔW или равна ей:

$$h\nu \geq \Delta W, \quad (2)$$

то благодаря приобретенной энергии валентные электроны способны перейти в зону проводимости. При этом в зоне проводимости появляются дополнительные свободные электроны, а в валентной зоне – дырки. Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости под действием света получил название внутреннего фотоэффекта.

Таким образом, облучение полупроводника светом достаточно высокой частоты приводит к увеличению концентрации свободных носителей зарядов и, следовательно, к увеличению проводимости полупроводника.

Увеличение проводимости полупроводника под действием света называется фотопроводимостью. Полупроводник, проводимость которого определяется интенсивностью освещенности, называется фоторезистором. Если фоторезистор включен в электрическую цепь последовательно с источником напряжения, то в темноте через него будет течь темновой ток I_T , при освещении же его поверхности в цепи будет течь световой ток I_C . Разность между установившимся световым током I_C и темновым током I_T называется фототоком

$$I_\phi (I_\phi = I_C - I_T). \quad (3)$$

Вольт-амперной характеристикой фоторезистора называется зависимость темнового тока, светового тока и фототока от приложенного к фоторезистору напряжения при неизменной величине светового потока, падающего на фоторезисторы.

Для большинства фоторезисторов эта зависимость имеет вид

$$I = KU, \quad (4)$$

где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа фоторезистора и интенсивности света.

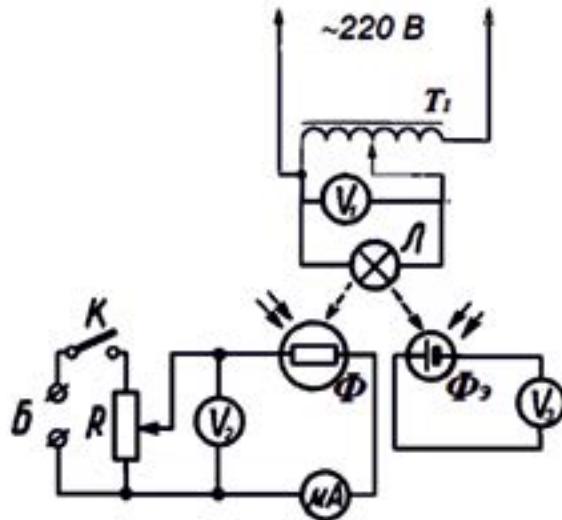


Рисунок 3 – Принципиальная схема для снятия характеристик фоторезисторов: Л – осветительная лампа; V_1 – вольтметр автотрансформатора T_1 ; Ф – фоторезистор; R – потенциометр; К – ключ; Б – источник постоянного тока (15–150 В); μA – микроамперметр (мультиметр № 1 на стенде); V_2 – (мультиметр № 2 на стенде); Φ_3 – фотоэлемент (солнечная панель PXWG SP5555); V_3 – модульный вольтметр

При изучении вольт-амперных характеристик фоторезисторов обычно получают вольт-амперные характеристики в темноте и при определенной освещенности (в нашем случае, освещенность изменяется путем изменения напряжения на лампе накаливания).

В одинаковых условиях по освещенности, вместе с исследуемой поверхностью, находится калиброванный фотоэлемент, по напряжению, которое на нем возникает, можно определить освещенность (рисунок 3)

При затемненном фоторезисторе ($E = 0$) измеряют темновой ток, а при освещении – световой. Затем находят фототок: $I_\Phi = I_c - I_T$. При изменении напряжения, приложенного к фоторезистору, от нуля до номинального значения для данной освещенности E через каждые 1–5 В находят зависимости:

$$I_T = f(U) \quad I_\Phi = f(U)_{E=\text{const}} \quad (5)$$

Для упрощения схемы вольтметры V_2 и V_3 можно заменить одним, используя пакетный переключатель (рисунок 4). Кроме того, для вариативности можно использовать несколько фоторезисторов разных марок.

Освещение фоторезистора изменяется одновременно с изменением освещения фотоэлемента, расположенного на одном уровне с фоторезистором, и измеряется напряжение на нем. Перед началом лабораторной работы с помощью люксметра проводится построение экспериментального графика зависимости напряжения на выводах фотоэлемента от освещенности. Это позволяет актуализировать междисциплинарные связи с такими дисциплинами, как метрология, стандартизация, более углубленно отработать навыки калибровки полупроводниковых приборов, что часто необходимо на практике.



Рисунок 4. – Внешний вид измерительного блока

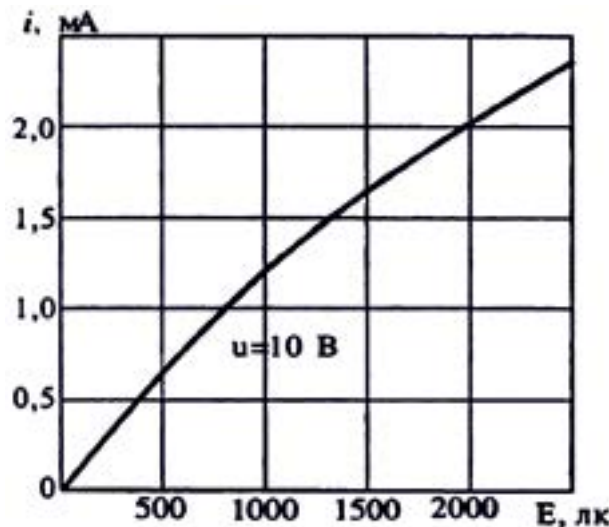


Рисунок 5 – Зависимость светового тока фоторезистора от освещенности

Зависимости $I_T = f(U)$ и $I_\phi = f(U)_{E=const}$ строят на одном графике.

Вольт-амперные характеристики у большинства фоторезисторов имеют линейный характер, то есть в широкой области изменения напряжения выполняется закон Ома, а фоторезисторы в области слабых электрических полей являются омическими сопротивлениями. У некоторых фоторезисторов в области малых или больших напряжений, приложенных к ним, наблюдаются отклонения от линейности.

Световой (люкс-амперной) характеристикой фоторезистора называется зависимость фототока от интенсивности освещения (светового потока или освещенности) при неизменном напряжении, приложенном к фоторезистору. Зависимость фототока фоторезисторов от освещенности определяется зависимостью фотопроводимости от интенсивности света: $\Delta\sigma \sim L^\alpha$ и в общем случае имеет нелинейный характер

$$I_\phi = C_1 \Phi^\alpha U = C_1 U S^\alpha E^\alpha, \quad (6)$$

где C_1 – коэффициент пропорциональности, U – приложенное напряжение, Φ – световой поток, α – показатель степени, значение которого могут быть 1, >1, <1; S – площадь фоторезистора; E – освещенность.

Для снятия световой характеристики фоторезистора используют схему (рисунок 3), устанавливают напряжение фиксированное U (в пределах допустимых значений) и, изменяя освещенность фоторезистора источником света, измеряют каждый раз освещенность E и микроамперметром токи I_T и I_c вычисляют ток I_ϕ .

Снимают зависимость $I_\phi = f(E)_{U=const}$ и выражают графически в одной системе ко-

ординат при различных приложенных напряжениях в пределах допустимых значений.

На практике люкс-амперные характеристики преимущественно приводятся в виде зависимости не фототока, а светового тока или сопротивления от освещенности (рисунок 5) [7].

Во многих случаях практического использования фоторезисторов большое значение придается кратности изменения сопротивления фоторезистора при освещении

$$\frac{R_T}{R_C} = \frac{I_C}{I_T} \quad (7)$$

и относительному изменению сопротивления

$$\frac{\Delta R}{R_T} = \frac{R_T - R_C}{R_C} \cdot 100\% \quad (8)$$

Для рабочего напряжения U_p и освещенности E находят темновой и световой токи, а затем вычисляют кратность изменения сопротивления. Темновое сопротивление фоторезистора и сопротивление его при освещении рассчитывают по закону Ома:

$$R_T = \frac{U_p}{I_T} \quad (9) \quad \text{и} \quad R_C = \frac{U_p}{I_C} \quad (10)$$

Таким образом, студенты при выполнении лабораторной работы:

1) на базе стенда собирают схему (рисунок 3) и снимают: вольт-амперную характеристику фоторезистора при дневной освещенности; световую характеристику при рабочем напряжении (220В) на фоторезисторе; затем

2) строят вольт-амперную $I_\phi = f(U)_{E=const}$ и световую $I_\phi = f(E)$ характеристики для исследуемого фоторезистора;

3) вычисляют для исследуемого фоторезистора кратность изменения сопротивления $\frac{R_T}{R_c} = \frac{I_c}{I_T}$, относительное изменение сопротивления $\frac{R_T - R_c}{R_c} \cdot 100\%$ для рабочего напряжения на фоторезисторе (22 В) и освещенности дневным светом.

Использование универсальных лабораторных стендов при выполнении данной работы позволяет изучать не только фоторезисторы, но и разнообразные приборы на основе различных полупроводниковых материалов. При этом увеличивается число индивидуальных заданий, но последовательность проведения работы в целом не меняется, а возможность заимствования студентами результатов и выводов исключается. В то же время это не приводит к усложнению проверки преподавателем выполненных заданий, так как зависимость сопротивления полупроводникового материала от освещенности носит общий принципиальный характер. Такой подход позволяет студентам развивать навыки поста-

новки экспериментального исследования, самостоятельного приобретения навыков по работе с полупроводниковыми приборами, измерительным оборудованием, способствует формированию профессиональных компетенций монтажа электрического оборудования, что очень важно для инженера.

Заключение. Разработанная лабораторная работа позволяет студентам глубже понять свойства полупроводников как целого класса материалов и возможностей его использования в современной электротехнике. В процессе ее выполнения студенты вырабатывают навыки самостоятельного использования электрооборудования, что особенно важно для будущего инженера. Отдельно стоит отметить, что указанная лабораторная работа базируется на универсальном электромонтажном комплексе белорусского производства, что позволяет говорить об импортозамещении и дает широкие возможности доработки существующих и постановки новых работ с минимальными изменениями в комплектации базового стенда 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестакова, Л. А. Междисциплинарная интеграция как методологическая основа современного образовательного процесса / Л. А. Шестакова // Вестник МГУ. Серия 3: Педагогика. Психология. Образовательные ресурсы и технологии. – 2013. – 1(2). – С. 47–52.
2. Электротехнические и конструкционные материалы : Учебно-методический комплекс по учебной дисциплине / Минсельхозпрод РБ, УО "БГАТУ", АЭФ, Кафедра ППС; сост.: Т. М. Ткаченко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2017.
3. Особенности постановки лабораторной работы по изучению электрических свойств проводниковых и полупроводниковых материалов на базе универсального электромонтажного комплекса / С. М. Барайшук [и др.] // Вестн БДПУ. Серия 3 – 2017. – № 4. – С. 23–28.
4. Привалов, Е. Е. Электроматериаловедение. Лабораторный практикум. Тесты. Методическое пособие / Е. Е. Привалов. – Ставрополь: АГРУС, 2012. – 81с.
5. Электротехнические материалы. Лабораторные работы (Практикум) / А. Н. Герасимович [и др.]. – Минск: БНТУ, 2004. – 97 с.
6. УП "НТП "Центр". [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Могилев, 2007. – Режим доступа : http://ntpcentr.com/ru/catalog/08_00/08_47_1/. – Дата доступа: 17.09.2017.
7. Юшин, А. Фоторезисторы / А. Юшин // РАДИО. – 1987. – № 01. – С. 58–61.

REFERENCES

1. Shestakova, L. A. Mezhdistsiplinarnaya integratsiya kak metodologicheskaya osnova sovremennogo obrazovatel'nogo protsesssa / L. A. Shestakova // Vestnik MGU. Seriya 3: Pedagogika. Psikhologiya. Obrazovatelnyye resursy i tekhnologii. – 2013. – 1(2). – S. 47–52.
2. Elektrotekhnicheskiye i konstruktсионnyye materialy : Uchebno-metodicheskiy kompleks po uchebnoy distsipline / Minсельхозпрод RB, UO "BGATU", AEF, Kafedra PPS; sost.: T. M. Tkachenko [i dr.]. – Minsk : BGATU, 2017.
3. Osobennosti postanovki laboratornoy raboty po izucheniyu elektricheskikh svoystv provodnikovyx i poluprovodnikovyx materialov na baze universal'nogo elektromontazhnogo kompleksa / S. M. Barayshuk [i dr.] // Vestsi BДPU. Seryya 3. – 2017. – № 4. – S. 23–28.
4. Privalov, Ye. Ye. Elektromaterialovedeniye. Laboratornyy praktikum. Testy. Metodicheskoye posobiye / Ye. Ye. Privalov. – Stavropol: AGRUS, 2012. – 81 s.
5. Elektrotekhnicheskiye materialy. Laboratornyye raboty (Praktikum) / A. N. Gerasimovich [i dr.]. – Minsk : BNTU 2004. – 97 с.
6. UP „NTP „TSENTR“ [Elektronnyy resurs] : ofits. sayt. – Mogilyov, 2007. – Rezhim dostupa: http://ntpcentr.com/ru/catalog/08_00/08_47_1/. – Data dostupa: 17.09.2017.
7. Yushin, A. Fotorezistory / A. Yushin // RADIO. – 1987. – № 01. – S. 58 – 61.