`

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, №

**ПРИБОРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ
В ЛАБОРАТОРИЯХ**

УДК 535.243; 681.518.3

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ МОНОХРОМАТОРА МДР-4 ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2025 г. А. А. Хачатурова*, А. А. Аракелян

Поступила в редакцию 00.00.2025 г.

После доработки 00.00.2025 г.

Несмотря на существующие технические решения [1-3], на рынке коммерческих предложений нет готового устройства для измерения фотоэлектрических параметров широкозонных полупроводников. Созданный аппаратно-программный комплекс успешно использован в научных исследованиях для измерения спектральных характеристик оптических материалов. Комплекс обеспечивает возможность проведения измерений ключевых фотоэлектрических свойств полупроводников и гетероструктур, а именно: фотолюминесценции, измерение зависимости фоточувствительности от длины волны возбуждающего излучения, определение красной границы фотоэффекта.

Комплекс основан на использовании монохроматора МДР-4 (ЛОМО) и платы ввода/вывода от компании National Instruments. Разработан программный пакет в среде LabView для управления монохроматором и для цифровой регистрации сигналов.

Монохроматор МДР-4 (ЛОМО) используется при изучении оптических свойств материалов в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Монохроматор оснащен шкалой, которая показывает текущую длину волны в нанометрах. Сканирование спектра в рабочем диапазоне монохроматора осуществляется шаговым двигателем. Блок управления шаговым двигателем ШДР-711 обеспечивает работу в двух режимах: в ручном и автоматическом. В автоматическом режиме управление шаговым двигателем осуществляется по командам, поступающим от ПК.

`

В зависимости от поставленной задачи в качестве излучателя используются широкополосные вольфрамовые лампы накаливания, лазерные диоды, и твердотельные лазеры.

На рис.1 приведена блок-схема комплекса, включающая аппаратную и программную части, для спектральных измерений фотолюминесценции и спектров оптического поглощения материалов. В качестве источника излучения применялась лампа накаливания КГМ 12-100 мощностью 100 Вт со световым потоком 3000 лм и цветовой температурой 2700 К. Питание лампы осуществлялось постоянным током от стабилизированного источника. Спектры поглощения измеряли в диапазоне от 350 до 900 нм. Образцы устанавливались непосредственно за выходной щелью монохроматора. Для регистрации прошедшего света использовался широкоапертурный фотодиод FDBS22 фирмы Thorlabs Si Photodiodes с фоточувствительностью в спектральном диапазоне от 240 до 1170 нм. Оптическое излучение модулировалось с частотой 177 Гц. Эта частота рекомендована для работы синхронных детекторов. Модулированный сигнал с фотодиода поступал на аналоговый синхронный детектор и усилитель. Выходной сигнал с синхронного усилителя поступал на модуль сбора данных (DAQ E Series фирмы National Instruments). На рис. 2 приведен полученный график зависимости фотолюминисценции YAG-Nd^{3+} от длины волны при возбуждении лазером с длиной волны 808 нм.

Для управления экспериментом и сбором данных было разработано программное обеспечение (ПО) в среде LabView и использовалась плата PCI-6035E фирмы National Instruments. С интерфейсной панели программы пользователь может установить необходимые входные параметры: начальное показание длины волны, шаг сканирования длины волны, количество отсчетов, тип дифракционной решетки, скорость регистрации сигнала. Выбор величины шага сканирования определяется в зависимости от разрешения дифракционной решетки. Полученные спектры на экране являются графическим отображением зависимости величины сигнала интенсивности от длины волны (нм или $см^{-1}$ по выбору оператора) и представлены в цифровом виде.

На рис. 3 представлена блок-схема установки для спектральных измерений фотоотклика, т.е. ампер-ватных характеристик при λ = const. Измерения проводились при освещении непрерывным излучением в спектральном диапазоне λ = 525-530 нм. На образец подавалось постоянное напряжение смещения U_0 = 10 В. Полученная характеристика ампер-ватной чувствительности исследуемой фоточувствительной структуры представлена на рис. 4. Эти экспериментальные зависимости в диапазоне интенсивностей от 0 до 80 мкВт/$см^2$ аппроксимировались линейной функцией, что соответствует изменению фототока в

`

диапазоне от 0 до 250 мкА. Ампер-ватная чувствительность в указанном линейном диапазоне токов составляет 3,16 мкА/мкВт. А в диапазоне интенсивностей от 10 до 200 мкВт/см^2 происходило насыщение. На рис. 5 приведена блок-схема установки для определения красной границы фотоэффекта. На рис. 6 приведена спектральная зависимость фотопроводимости в диапазоне энергии фотона 1–3,3 эВ, нормализованная по амплитуде максимума. Измерения проведены при различных частотах переменного электрического поля, приложенного к образцу.

Основные технические характеристики. Экспериментальная установка позволяет проводить измерения ключевых фотоэлектрических характеристик пленок полупроводников в диапазоне от 3,1 до 1,1 эВ (от 400 до 1113 нм) при возбуждении светом в указанном диапазоне длин волн. Данный комплекс был создан на основе модуля сбора данных от компании National Instruments с программой LabView и монохроматора МДР-4.

Полученные результаты подтверждают возможность применения комплекса. Тем самым создан лабораторный образец, позволяющий в дальнейшем коммерциализировать полученные результаты в виде устройства для измерения фотоэлектрических характеристик.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Представленные исследования проводились при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках бюджетного финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Особая благодарность за помощь и обсуждения работы заведующему лабораторией Кристаллооптики ИФИ НАН РА Овсепян Р.К. и ведущему научному сотруднику ИФИ НАН РА Агамалян Н.Р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *А. Л. Филатов, О. А. Бышевский-Конопко, Н. Г. Яременко, М. В. Карачевцева, Е. М. Кораблев*. // ПТЭ. 2022. № 1. С. 97. http://doi.org/10.31857/S0032816222010037
2. *Khachaturova, A.A., Nersisyan, M.N. & Ayvazyan, O.L.* // Instrum Exp Tech. 2025. V. 68. P. 243. https://doi.org/10.1134/S0020441225700459
3. *Лазарев В.В., Блинов Л.М., Юдин С.Г., Артемов В.В., Палто С.П.* // ЖЭТФ. 2020. Том 157. №1. С. 156. http://doi.org/10.31857/S0044451020010186

`

Адрес для справок: Армения, 0204, Аштарак-2, Институт Физических Исследований, Национальная Академия Наук РА. *E-mail: annakhachatur70@gmail.com

`

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Блок-схема установки для спектральных измерений фотолюминесценции: О – образец; М - модулятор; БУШД-блок управления шаговым двигателем; D_0 – цифровой выход модуля сбора данных; A_i – аналоговый вход модуля сбора данных.

Рис. 2. График зависимости фотолюминисценции YAG-Nd^{3+} от длины волны при возбуждении лазером с длиной волны 808 нм.

Рис. 3. Блок-схема установки для спектральных измерений фотоотклика ампер-ватных характеристик при λ = const, где:
излучатель – лампа накаливания КГМ-9; О – образец; оптический дисковый аттенюатор - изменяет интенсивность на определенной длине волне. Интенсивность варьируется от 0 до 22 μВт/см^2; БУШД – блок управления шаговым двигателем; И – измеритель мощности оптических сигналов; A_o и A_i - аналоговый выход и вход модуля сбора данных соответственно.

Рис. 4. Характеристика ампер-ватной чувствительности пленки CdS при освещении непрерывным излучением в спектральном диапазоне λ = 525-530 нм.

Рис. 5. Блок-схема установки для определения красной границы фотоэффекта, где:
О - образец; ФП – эталонный фотоприемник (ПДА 50 B-EC, фирмы THORLabs).
Излучатель – лампа накаливания КГМ-9; A_o и A_{i1}, A_{i2} - аналоговый выход и входы модуля сбора данных соответственно.
Электрическая схема измерения фототока представлена на вставке к схеме, где:
1 - подложка пленки ситалл; 2 – полупроводниковая пленка CdS:Li; 3 – серебряные электроды с источником питания и эталонным сопротивлением.

Рис. 6. Нормализованная спектральная чувствительность фотопроводимости пленок CdS:Li при освещении непрерывным излучением, с использованием постоянного и переменного токов (DC; 100 kHz; 1 MHz; 4 MHz; 8MHz). Напряжение смещения — Ubias = 10 В.

`

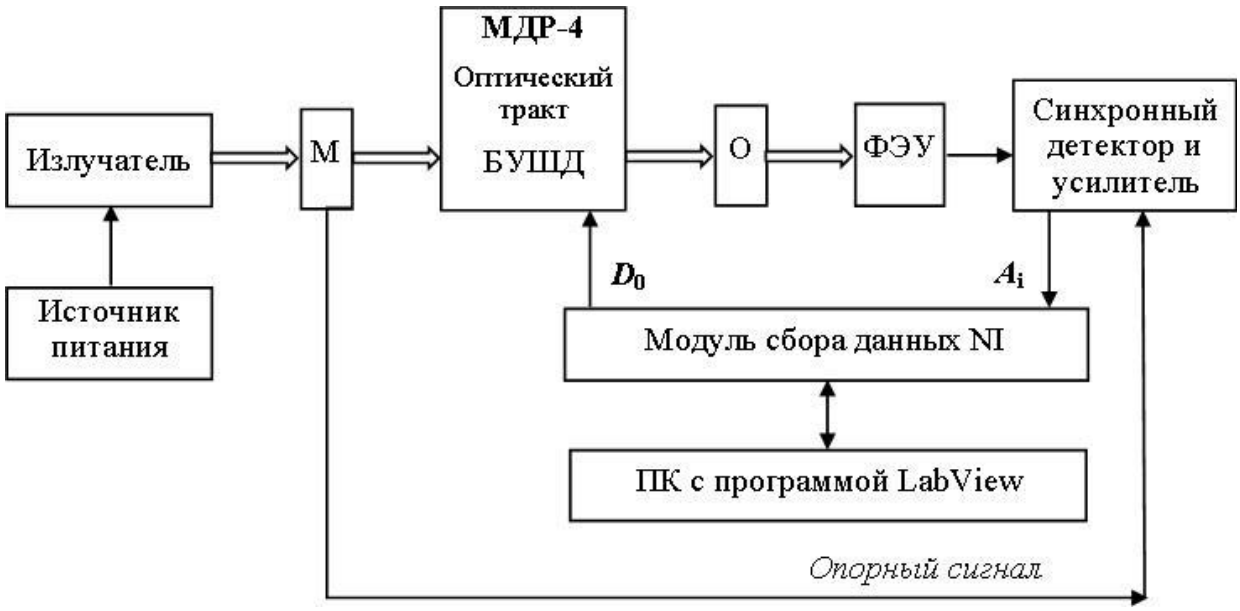
МДР-4
Оптический тракт
БУШД
Излучатель
М
О
ФЭУ
Синхронный детектор и усилитель
Источник питания
D_0
A_i
Модуль сбора данных NI
ПК с программой LabView
Опорный сигнал

Рис. 1.

`

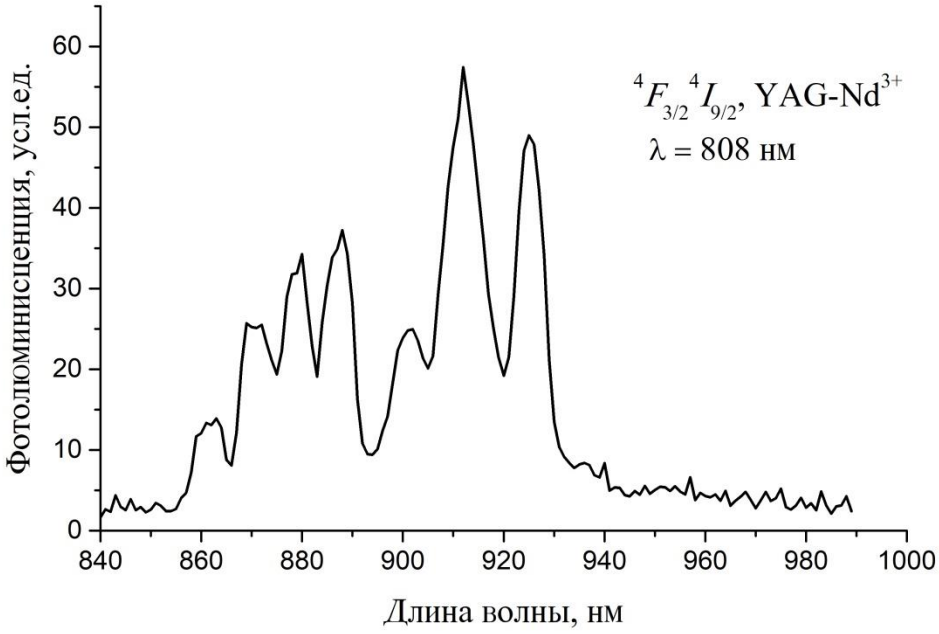
$^4F_{3/2}$ $^4I_{9/2}$, YAG-Nd^{3+}
λ = 808 нм
Фотолюминисценция, усл.ед.
Длина волны, нм
0
10
20
30
40
50
60
840
860
880
900
920
940
960
980
1000

Рис. 2

`

И
МДР-4
Оптический тракт
БУШД
Излучатель
Оптический дисковый аттенюатор
О
Усилитель
A_o
A_{i1}
A_{i2}
Модуль сбора данных NI
ПК с программой LabView

Рис. 3

`

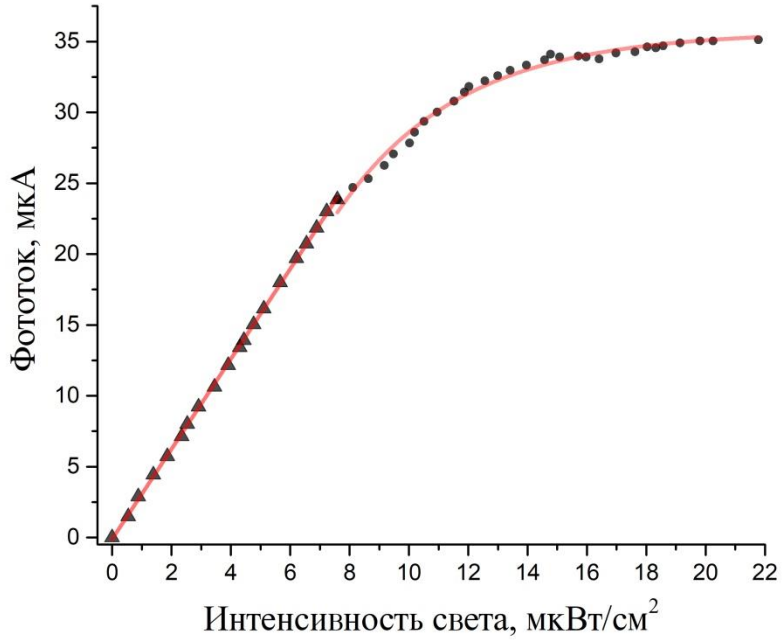
Фототок, мкА
0
5
10
15
20
25
30
35
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
Интенсивность света, мкВт/см^2

Рис. 4

`

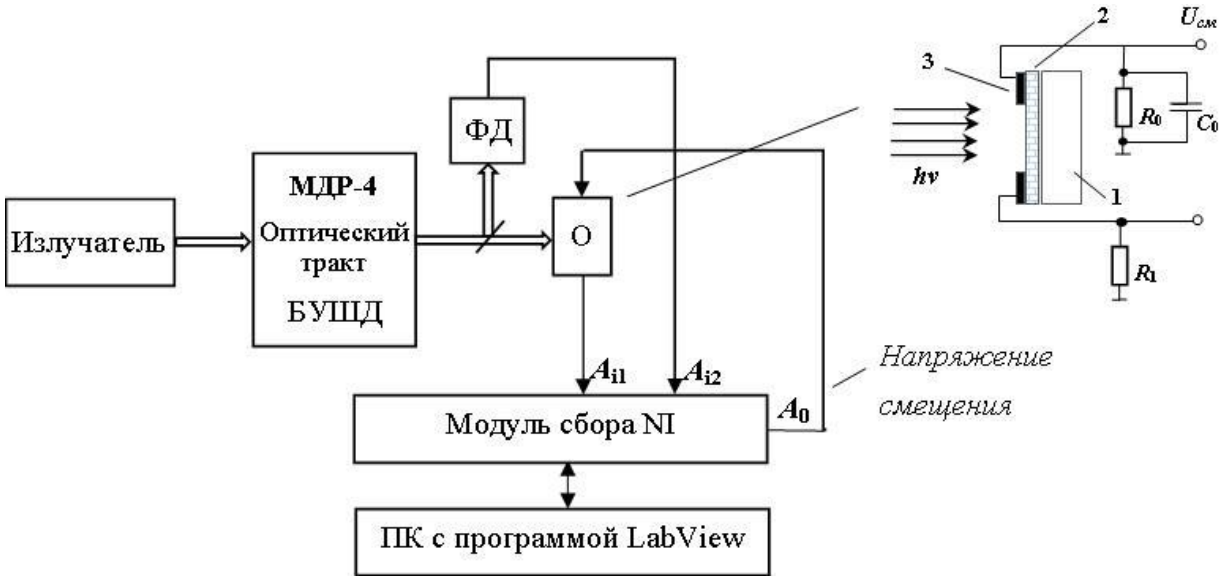
Излучатель
МДР-4
Оптический тракт
БУШД
ФД
О
A_{i1}
A_{i2}
A_0
Модуль сбора NI
ПК с программой LabView
Напряжение смещения
$U_{см}$
2
3
1
R_0
C_0
R_1
hv

Рис. 5

`

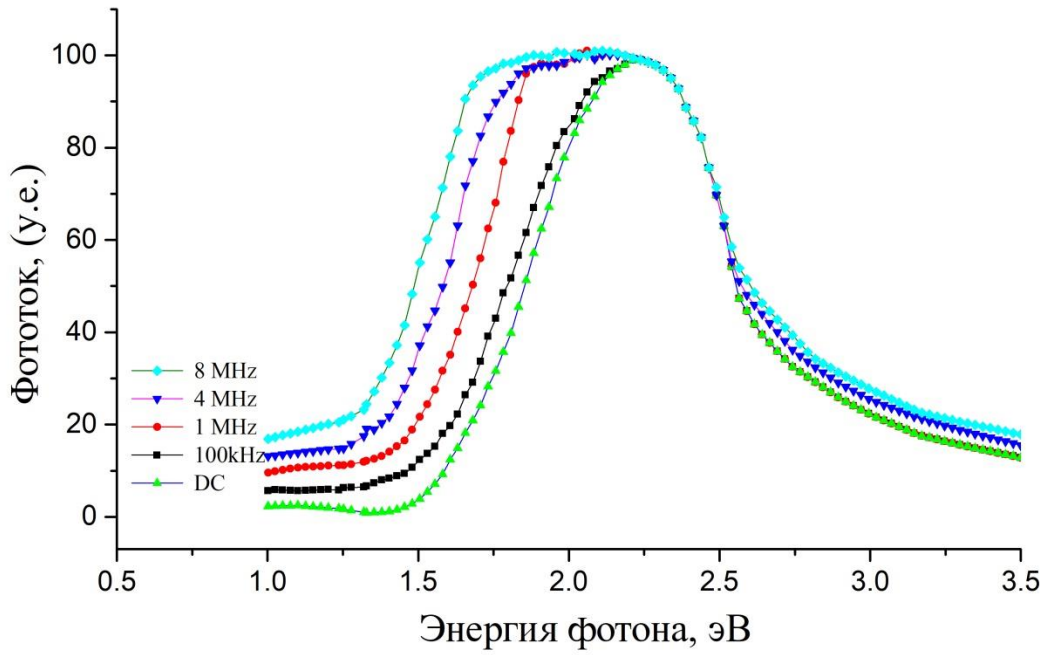
Фототок, (у.е.)
100
80
60
40
20
0
8 MHz
4 MHz
1 MHz
100kHz
DC
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
Энергия фотона, эВ

Рис. 6