

## ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА ОТРАЖЕНИЯ В ОДНОЛУЧЕВОЙ СХЕМЕ

© 2020 г. А. А. Ковалёв\*

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*

*\*e-mail kovalev@isp.nsc.ru*

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

После доработки 03.06.2020 г.

Принята к публикации 05.06.2020 г.

Разработана схема измерения спектра отражения с точностью на уровне  $10^{-3}$  для широкой спектральной области. Для иллюстрации получены спектры отражения подложки GaAs с просветляющим покрытием и слоя квантовых ям InGaAsP/InP на подложке InP.

DOI: 10.31857/S0032816220060129

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большое количество коммерчески доступных рефлектометров, в исследованиях требуются все более совершенные измерительные схемы таких приборов, ориентированные на решение конкретной задачи. Так, в [1] сообщается об оптоволоконном фурье-спектрометре, легком и малогабаритном, допускающем измерение спектров различных веществ на удалении от спектрометра. В [2] описаны результаты разработки быстродействующего и обладающего высокой чувствительностью спектрометра, предназначенного для исследования спектров отражения природных объектов в видимой области спектра. В [3] представлен рефрактометр, позволяющий определять показатель преломления прозрачных жидких и твердых сред в широком спектральном диапазоне — от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного излучения.

В процессе разработки полупроводниковых зеркал с насыщающимся поглощением на основе слоя квантовых ям [4] исследователи сталкиваются со следующей проблемой. Наноразмерные полупроводниковые структуры могут быть изготовлены на подложках, поглощающих рабочее излучение, с последующим удалением подложки. На промежуточном этапе необходимо получить сведения о том, насколько поглощение квантовых ям соответствует заданному спектральному диапазону и какова кинетика насыщения и восстановления поглощения слоя квантовых ям. В этом случае единственный метод исследования — спектроскопия отражения.

Для исследования кинетики отражения создана высокочувствительная схема “накачка—зон-

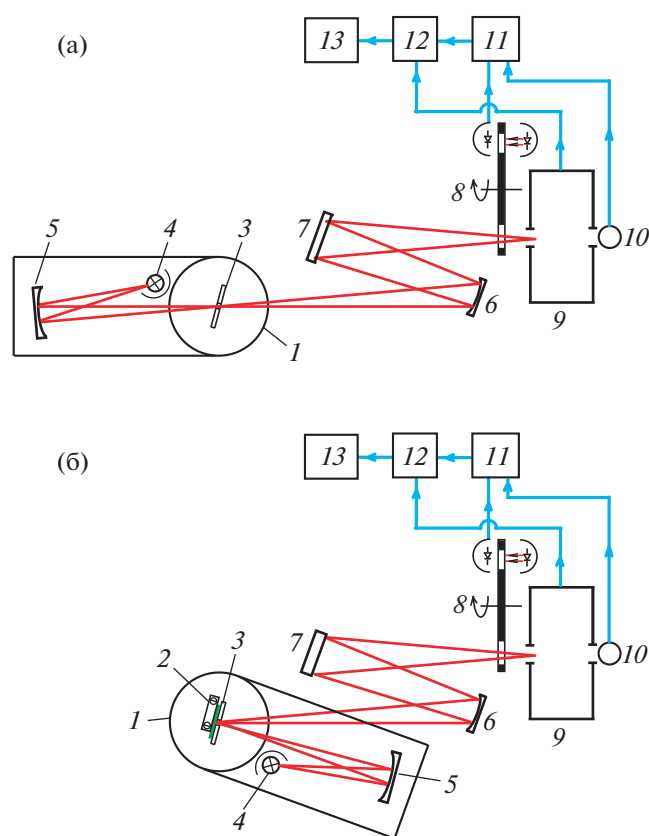
дирование” с острой фокусировкой излучения фемтосекундного лазера [5]. Острая фокусировка излучения необходима как для достижения насыщения поглощения, так и в связи с тем, что опытные образцы характеризуются малыми размерами в силу латеральной неоднородности, характерной для процесса изготовления структур методом молекулярно-пучковой эпитаксии [6].

Для получения ненасыщенных спектров отражения таких образцов (от некогерентного источника света) также необходимо использовать световые пучки с поперечным размером порядка 1 мм и менее. Для измерений спектров отражения используются однолучевые схемы. Так, в [7] коэффициент отражения определяется отношением сигналов фотодетектора с образцом в оптическом пути и без него; при этом важна идентичность условий прохождения лучей в приборе для этих двух измерений. В [7] идентичность достигается применением двух одинаковых зеркал; в варианте однолучевой схемы [8] используется поворот барабана в той же схеме и работает то же зеркало.

В данной работе предложен и проверен экспериментально относительно простой и точный метод регистрации спектра отражения в однолучевой схеме.

### ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Измерение коэффициента отражения является необходимой процедурой при исследовании пленочных образцов на подложках, имеющих поглощение в рассматриваемой спектральной области, а также в случае малых коэффициентов отражения, для которых при измерении пропускания



**Рис. 1.** Схема получения опорного сигнала от потока излучения: **а** – падающего на образец; **б** – отраженного от образца. 1 – поворотный столик; 2 – крепление образца; 3 – диафрагма, ограничивающая пучок света; 4 – источник излучения; 5 – сферическое зеркало, формирующее пучок, падающий на диафрагму; 6 – зеркало, формирующее пучок, падающий на щель монохроматора; 7 – поворотное зеркало; 8 – прерыватель пучка с оптронной парой, образующей опорный сигнал для синхронного детектирования; 9 – монохроматор МДР-2; 10 – фотодетектор ФД-9; 11 – синхронный детектор; 12 – аналого-цифровой преобразователь; 13 – компьютер.

необходимо пользоваться различными компенсационными схемами. Измерение коэффициента отражения в двухлучевых оптических схемах наталкивается на трудность обеспечения в опорном канале сигнала 100%-ного отражения в необходимом спектральном диапазоне, что означает также установку в нем дополнительных оптических элементов.

Принцип действия предлагаемого устройства заключается в последовательном измерении сигнала от пучка излучения, прошедшего через центр поворотного столика (рис. 1а), и сигнала от того же пучка излучения, но отраженного от образца, помещенного в центр столика (рис. 1б).

Оптической схеме на рис. 1а соответствует установка, фотография которой представлена на рис. 2, а схеме на рис. 1б – установка, фотография которой приведена на рис. 3.

Оптическая часть установки (см. рис. 1) состоит из поворотного столика 1, в центр которого помещена диафрагма 3 диаметром 1.4 мм, не имеющая отражения и механически не связанная с поворотным столиком, т.е. ее положение не меняется при повороте столика.

Осветитель образован галогеновой лампой 4 и алюминиевым зеркалом 5 с радиусом кривизны 150 мм. Осветитель жестко закреплен на поворотном столике 1, и пучок излучения от зеркала 5 направлен в область диафрагмы 3 строго по радиусу поворотного столика. При повороте столика с осветителем, т.е. при переходе от измерения с проходящим пучком (см. рис. 1а) к измерению с отраженным от образца пучком (см. рис. 1б), величина светового потока в области диафрагмы не меняется.

В случае измерения с образцом (см. рис. 1б) последний плотно прижимается к диафрагме креплением 2. Пучок, прошедший через диафрагму (см. рис. 1а) или отраженный от образца (см. рис. 1б), фокусируется при помощи алюминиевого зеркала 6 с радиусом кривизны 260 мм и плоского зеркала 7 через прерыватель 8 на щель решетчатого монохроматора 9, а затем регистрируется подходящим фотодетектором.

Электронная часть установки содержит синхронный детектор, регистрирующий сигнал фотодетектора, аналого-цифровой преобразователь, на который поступают сигналы с фотодетектора, и устройства управления монохроматором и компьютером, обеспечивающим обработку полученной информации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ, ИЛЛЮСТРИРУЮЩИЕ МЕТОД

В качестве иллюстрации работы оптической схемы на рис. 4а приведены спектры отражения от просветленной подложки GaAs (просветляющий слой окиси европия), а на рис. 4б – спектры отражения от полупроводниковой структуры с квантовыми ямами, согласованными с барьерами по параметру решетки.

В спектре на рис. 4а увеличение отражения в коротковолновой области (для длин волн  $< 875$  нм), соответствующего границе фундаментального поглощения, обусловлено поглощением, а в длинноволновой области – недостаточным просветлением одиночным слоем окиси европия.

В спектре на рис. 4б видна граница фундаментального поглощения материала подложки InP, легированного железом, в области 950 нм, а также наблюдается область 980–1030 нм, соответствующая поглощению слоем квантовых ям из кватернарного соединения InGaAsP, согласованного по параметру решетки с материалом барьеров InP. В данном случае выбраны толстые барьеры (10 нм)

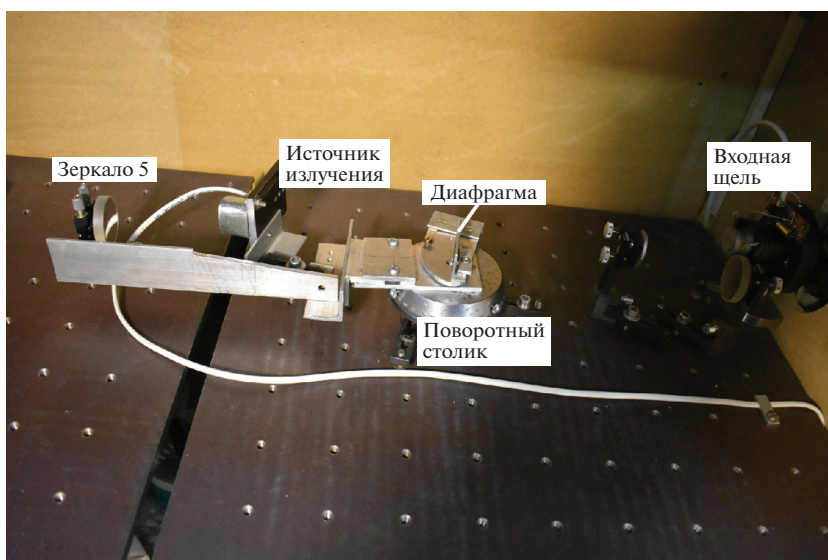


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки с оптической схемой на рис. 1а.

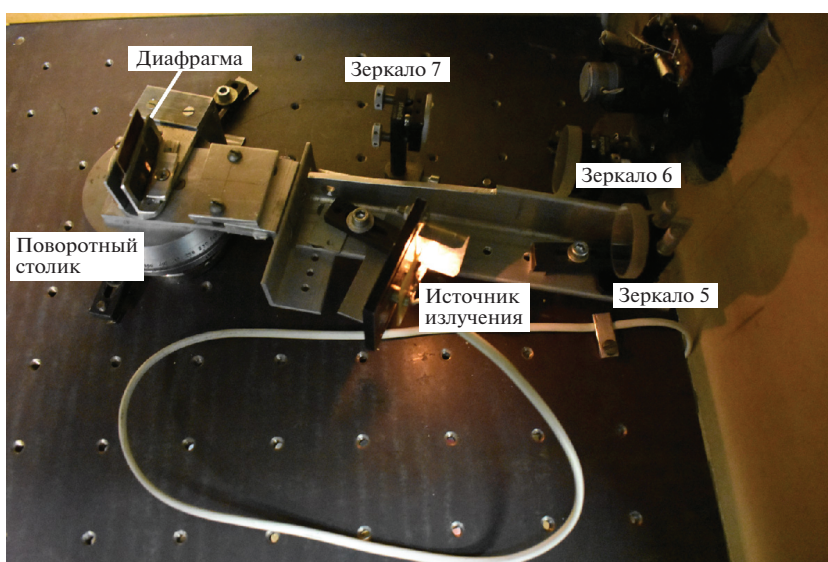


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки с оптической схемой на рис. 1б.

для более уверенного определения спектральной области поглощения квантовых ям.

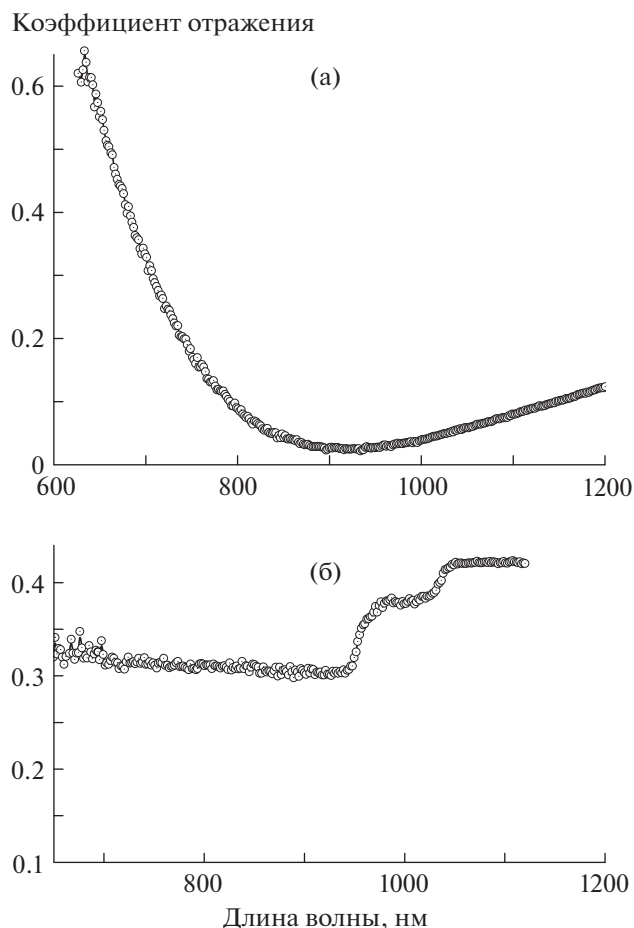
### ОБСУЖДЕНИЕ

В предлагаемой схеме измерения спектров отражения используется минимальное количество зеркал, в отличие от работы [8]. Еще одно отличие от работ [7, 8] состоит в том, что используется поворот осветительного устройства. В данной схеме идентичность оптических путей светового луча при двух измерениях (на просвет через диафрагму и на отражение от исследуемого образца) довольно велика. Она определяется тем, насколько по-

ложение пятна от источника света в плоскости диафрагмы без образца совпадает с положением пятна на поверхности образца.

В качестве источников ошибки могут выступать отклонение от плоскостности поверхности диафрагмы, к которой прижимается образец, неплоская поверхность самого образца, наконец, неточное совпадение положений пятен от источника света в двух измерениях, которые контролируются визуально.

Учет суммарного действия всех факторов позволяет оценить точность измерений как  $10^{-3}$ , что совпадает с результатом работы [8]. В примерах



**Рис. 4.** Спектр отражения: **а** – подложки GaAs, просветленной слоем  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ; **б** – слоя квантовых ям InGaAsP, согласованных по параметру решетки с барьерами InP и выращенных на подложке InP/Fe.

записей спектров отражения на рис. 4 уровень шума превышает уровень электронных шумов детектора и регистрирующей аппаратуры. При необходимости пятно фокусировки излучения в области диафрагмы может быть уменьшено; предел фокусировки будет определяться насыщением поглощения излучением осветителя, к чему полупроводниковые структуры весьма чувствительны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Достоинством предложенного метода измерения спектров отражения является простота оптической схемы, включающей минимум элементов и позволяющей выделить на поверхности образца минимальные размеры исследуемой области.

Приведенные результаты измерений спектров отражения соответствуют области ближнего инфракрасного излучения, согласно задаче разработки полупроводниковых затворов для лазеров ближнего инфракрасного диапазона спектра. Так как оптическая схема данного рефлектометра не содержит оптических элементов, работающих на пропускание излучения, при необходимости спектральная область может быть расширена применением других фотодетекторов и источников излучения.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-29-20007.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов А.А., Вагин В.А., Мошкин Б.Е., Хорохорин А.И., Хитров О.В. // ПТЭ. 2009. № 6. С. 143.
2. Кувалдин Э.В., Сурин В.Г. // ПТЭ. 1994. № 4. С. 154.
3. Соколов В.И., Китай В.С., Мишаков Г.В., Молчанова С.И., Панченко В.Я., Соколова И.В. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 157.
4. Keller U., Weingarten K. J., Kärtner F. X., Kopf D., Braun B., Jung I.D., Fluck R., Hönninger C., Matuschek N., *Aus der Au J.* // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics (JSTQE). 1996. V. 2. P. 435.
5. Борисов Г.М., Гольдорт В.Г., Ковалёв А.А., Ледовских Д.В., Рубцова Н.Н. // ПТЭ. 2018. № 1. С. 87. <https://doi.org/10.1134/S0020441218010025>
6. Rubtsova N.N., Kovalyov A.A., Ledovskikh D.V., Preobrazhenskii V.V., Putyato M.A., Semyagin B.R., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Semenko A.V. // Laser Physics. 2020. V. 30. P. 025001. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab5946>
7. Strong J. // Procedures in Experimental Physics. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1938. P. 376.
8. Bennett H.E., Koehler W.F. // J. Opt. Soc. Am. 1960. V. 50. P. 1. <https://doi.org/10.1063/1.1145344>