

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 53.082

УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕРМОРЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2023 г. А. Н. Котов^{a,*}, А. А. Старостин^a, В. В. Шангин^a,
С. Б. Бобин^{b,**}, А. Т. Лончаков^b

^aИнститут теплофизики УрО РАН

Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

^bИнститут физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН

Россия, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

*e-mail: artem625@mail.ru

**e-mail: bobin@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022 г.

После доработки 20.12.2022 г.

Принята к публикации 19.01.2023 г.

Разработаны конструкция экспериментальной ячейки и оптоэлектронный блок для исследования релаксационных процессов в приповерхностной области полупроводников при импульсном лазерном облучении в температурном диапазоне от 3 до 300 К и магнитном поле до 12 Тл.

DOI: 10.31857/S0032816223030230, EDN: CWJFVM

Экспериментальная установка предназначена для исследования процессов температурной релаксации на поверхности полупроводниковых материалов по отраженному излучению в схеме “накачка–зондирование” [1]. Для подвода излучения к образцу используется одномодовое волокно. Торец световода и поверхность образца образуют интерферометр Фабри–Перо с зазором около 100 мкм, чувствительный к фазе отраженной волны [2]. По световоду передаются два лазерных луча разной мощности и с разной длиной волны. Луч импульсной накачки с длиной волны 1470 нм осуществляет локальный нагрев образца на площадке диаметром 20–30 мкм. Постоянное зондирующее маломощное излучение с длиной волны 1530 нм отражается от поверхности образца и торца световода с последующей интерференцией. Измеряемый сигнал термоотражения, синхронный с импульсом накачки, формируется на выходе селективного фотоприемника. Установка измеряет комплексный коэффициент отражения на линейном участке характеристики интерферометра Фабри–Перо. Выходной сигнал интерферометра зависит от изменения фазы и амплитуды отраженного от образца излучения. Соответственно выходной сигнал зависит от изменения комплексного показателя преломления и от смещения поверхности в результате теплового расширения. В нашем случае, даже при хорошем поглощении излучения, импульсный нагрев образ-

ца не превышает нескольких кельвинов [1], а глубина прогреваемого приповерхностного слоя составляет единицы микрон, поэтому вклад в результирующий сигнал от возможного смещения поверхности на доли нанометра при имеющейся чувствительности около 8 мВ/нм не превышает уровня шума.

На рис. 1а показана конструкция миниатюрной немагнитной сборки с возможностью откачки воздуха и напуска газообразного гелия. Измерительная ячейка закреплена в цилиндрической вакуумной камере (трубке) 3 диаметром 20 мм на медной теплоотводящей шине 5. Вакуумная камера 3 с ячейкой 4 помещается в гелиевый криостат 1 со сверхпроводящим соленоидом фирмы “Oxford Instruments”. Внутри ячейки исследуемый образец 7 в форме прямоугольного параллелепипеда с характерными размерами $1 \times 2 \times 4$ мм может смещаться с помощью цилиндрического пьезоактюатора 9 относительно торца световода для регулировки рабочей точки интерферометра Фабри–Перо. После охлаждения в криостате температура образца регулируется с помощью специального электрического нагревателя 8. Измерение температуры образца осуществляется миниатюрным германиевым термометром, расположенным рядом с образцом. Температура корпуса ячейки контролируется с помощью угольного термометра. Электрические провода и оптическое волокно выводятся через герметичные разъемы.

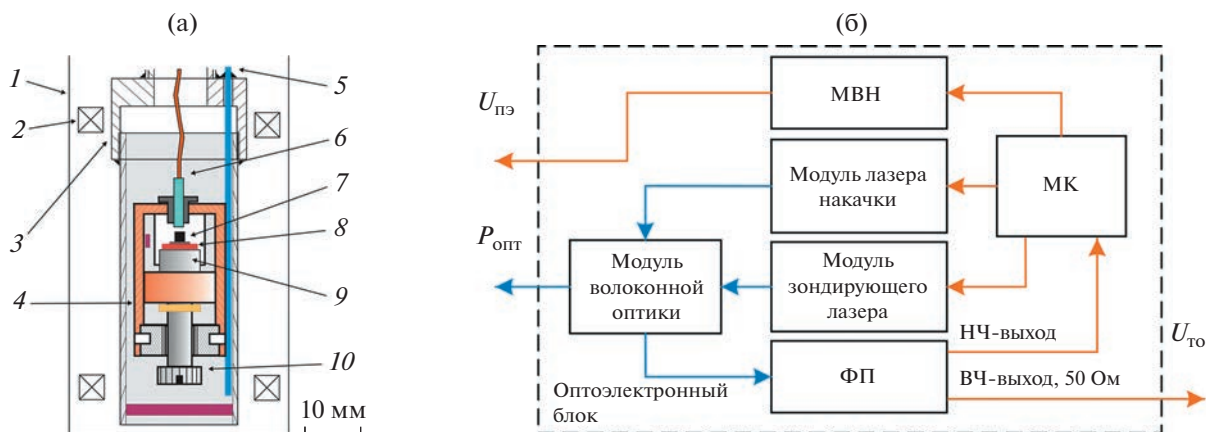


Рис. 1. а — схема размещения измерительной ячейки в вакуумной камере и сверхпроводящем соленоиде: 1 — криостат, 2 — магнитная система, 3 — вакуумная камера, 4 — корпус ячейки, 5 — теплоотводящая шина, 6 — оптоволокно с керамическим ферулом, 7 — образец, 8 — электрический нагреватель, 9 — пьезокерамический актюатор, 10 — юстировочный винт; б — схема оптоэлектронного блока: МК — микроконтроллер, ФП — фотоприемник, МВН — модуль высокого напряжения, $U_{то}$ — электрический сигнал термоотражения, $P_{опт}$ — оптическое излучение на выходе модуля волоконной оптики, $U_{пз}$ — напряжение управления пьезоактюатором.

На рис. 1б показана схема оптоэлектронного блока. Модуль лазера накачки обеспечивает импульсное излучение мощностью до 0.2 Вт при длительности от 0.01 до 10 мкс. Модуль зондирующего лазера генерирует постоянный оптический сигнал мощностью до 3 мВт. Дрейф мощности лазеров не превышает 1%. Объединение и разделение лучей происходит в модуле волоконной оптики. Отслеживание измерительного сигнала и выбор необходимого напряжения управления пьезоэлектрического актюатора с подбором оптимальной рабочей точки интерферометра реализует электронный блок на основе микроконтроллера МК. Блок содержит модуль фотоприемника ФП отраженного пробного излучения. Фотоприемник имеет два тракта преобразования сигнала: низкочастотный (НЧ) — для отслеживания температурного дрейфа (0–10 Гц) и высокочастотный (ВЧ) — для передачи сигнала термоотражения (0–100 МГц). Амплитуда сигнала термоотражения не превышает 2% от диапазона интерферометра. Схема цифровой компенсации дрейфа позволяет усилить и выделить слабый сигнал термоотражения с минимальными искажениями. Модуль высокого напряжения МВН в схеме компенсации позволяет регулировать напряжение актюатора в диапазоне 0–3 кВ с дискретностью 1 В. Регулировкой напряжения актюатора обеспечивается стабилизация рабочей точки в середине линейного участка выходной характеристики интерферометра с погрешностью 0.5%.

Для проведения измерений полированный или травленный образец 7 устанавливается на плоский электронагреватель 8 специальной формы, прикрепленный к пьезоэлектрическому элементу 9. Юстировкой образца относительно тор-

ца световода 6 достигается максимальный сигнал отраженного излучения. После герметизации камеры 3 из нее откачивается воздух и при необходимости напускается гелий. Полученная сборка охлаждается в криостате 1. Для задания температуры образца регулируется ток нагревателя с контролем нагрева по датчику вблизи образца. После достижения теплового квазиравновесия с помощью регулятора напряжения актюатора 9 устанавливается рабочая точка на характеристике интерферометра по уровню напряжения с низкочастотного выхода ФП. Измерение проводится с высокочастотного выхода ФП по серии импульсов накачки с накоплением результатов в цифровом осциллографе. Накопление позволяет увеличить соотношение сигнал/шум.

На рис. 2 показан пример сигнала отражения для образца *n*-Ge при разных температурах. Концентрация электронов в образце $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, что соответствует при низких температурах диэлектрической стороне перехода металл–диэлектрик. При комнатной температуре образец имел удельное сопротивление $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Длительность импульса накачки составляла 5 мкс. При комнатной температуре наблюдался классический вид теплового сигнала термоотражения 1 с участками монотонного нагрева и охлаждения. При уменьшении температуры до 80 К становится существенным сдвиг края фундаментального поглощения германия в область высоких энергий. Соответственно, поглощение греющего луча уменьшается, а значит, уменьшается и нагрев, создаваемый излучением накачки. Следует учесть, что температурный коэффициент линейного расширения германия при низких температурах также уменьшается и меняет знак [3]. Поэтому приведенный на рис. 2

сигнал 2, характерный для диапазона 10–80 К, отражает в основном изменение комплексного показателя преломления. Практически прямоугольный сигнал 2, соответствующий импульсу накачки, вероятно, формируется за счет фотоиндуцированного изменения отражения зондирующего луча. Релаксация фотоэлектрических явлений протекает со значительно более высокой скоростью, чем релаксация тепловых явлений. Поэтому при анализе получаемых результатов можно использовать это различие в скорости релаксации для определения протекающего процесса. При низкой температуре (3.3 К) наблюдался более сложный вид сигнала 3, требующий дальнейшего изучения.

Зарегистрировано значительное влияние магнитного поля при температурах ниже 40 К. Исходно близкий к прямоугольному сигнал 5 начал искажаться при индукции поля более 2 Тл, принимая вид осциллирующих затухающих колебаний при включении и выключении лазерного импульса накачки. В диапазоне 10–40 К действие поля проявлялось наиболее ярко — как переход от простого прямоугольного импульса к сложному процессу затухающих колебаний (см. вставку к рис. 2). Длительность наблюдаемого переходного процесса сигнала “магнитотермоотражения” составляет десятки микросекунд, что более характерно для тепловых процессов релаксации. Вместе с тем длительная релаксация в непрямоzonном *n*-Ge возможна также из-за особенностей механизма межзонной рекомбинации электронов.

Приведенные примеры показывают возможности метода для исследования вкладов в наблюдаемый термооптический сигнал от различных механизмов формирования отраженного излучения на поверхности образцов полупроводниковых материалов в зависимости от скорости и характера релаксации наведенных возмущений.

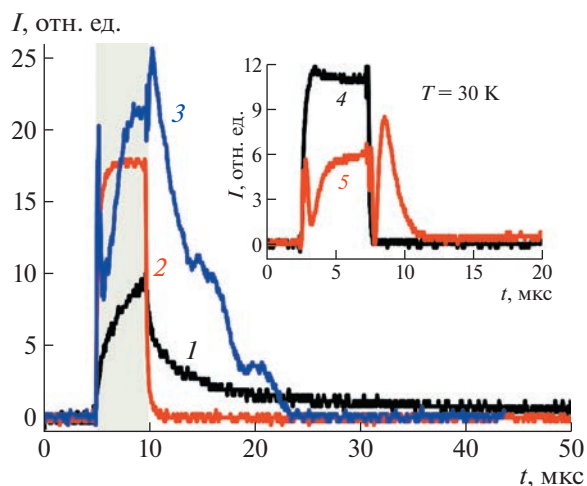


Рис. 2. Примеры сигналов термоотражения для образца *n*-Ge при температурах 300 (1), 80 (2) и 3.3 К (3) без магнитного поля. Серым цветом выделен интервал импульса накачки длительностью 5 мкс. На вставке показано изменение зондирующего сигнала при отсутствии магнитного поля (4) и при действии магнитного поля 2.5 Тл (5) при температуре 30 К.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00789.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Starostin A.A., Shangin V.V., Lonchakov A.T., Kotov A.N., Bobin S.B. // *Annalen der Physik* 2020. V. 532. Iss. 8. P. 1900586. <https://doi.org/10.1002/andp.201900586>
2. Wang T., Zheng S., Yang Z. // *Sensors and Actuators A*. 1998. V. 69. P. 134.
3. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. М.: Машиностроение, 1975.