

УДК 53.082.56

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ БЛИЖНЕПОЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП КРИОСБОМ101

М. Г. Петрова, Г. В. Мишаков, Е. И. Демихов, А. И. Шарков

*Разработан оптический сканирующий микроскоп ближнего поля. Спроектирован криостат для получения низких температур в диапазоне 1.8–300 К. Усовершенствован блок управления и программное обеспечение микроскопа с учетом температурного диапазона. Отработана методика измерений при комнатной температуре на тестовых решетках алюминия на стекле с периодом 4 мкм. Установлен оптимальный размер поля сканирования, позволяющий пренебрегать нелинейностями пьезокерамики.*

**Ключевые слова:** сканирующая микроскопия, зондовая микроскопия, ближнее поле, низкие температуры.

1. *Назначение и принцип действия.* Низкотемпературный сканирующий ближнепольный оптический микроскоп КриоСБОМ101 – это прибор для изучения оптических свойств наноструктур с разрешением, значительно превышающим дифракционный предел [1]. Ближнепольная микроскопия представляет большой интерес для научных исследований и современных технологий. Это связано с тем, что с ее помощью можно изучать объекты без их повреждения и в естественном окружении [2]. СБОМ позволяет получать изображение как для прозрачных [3], так и для отражающих объектов [4, 5], обладает высоким пространственным разрешением [3, 6, 7].

Важнейшим развитием идеи ближнепольной микроскопии являются спектроскопические исследования при низких температурах [8]. Основные объекты таких исследований – квантовые структуры (например, квантовые точки [9] и нити). Существует множество причин для перехода к низким температурам: квантовые эффекты, прису-

---

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, РТИ Криомагнитные системы, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53; e-mail: rti@cryo.ru.

щие твёрдым телам, заметно усиливаются, поскольку все безызлучательные процессы подавляются (исчезает тепловой шум).

Т а б л и ц а 1

Наименование	Параметры
<b>1. Микроскоп</b>	
Разрешение, нм	30–50
Расстояние между образцом и зондом, нм	5–10
Апертура острия волокна, нм	30–70
Максимальное поле сканирования, мкм	15 × 15
Грубый повод при комнатной температура, мкм	10–1
Мода AFM	есть
<b>2. Криостат</b>	
Хладагент	He
Емкость азотного резервуара, л	3.6
Емкость гелиевого резервуара, л	4
Диаметр шахты D2, мм	60
Диаметр гелиевых окон, мм	20
Диаметр наружных окон, мм	38
Количество окон, мм	4
Диапазон изменения температуры с tstat310 (He), К	4.2–300
Точность стабилизации температуры (He), К	±0.1
Температура при откачке паров (He), К	1.8

Основные стадии получения изображения [10]:

– Луч лазера через согласующий элемент попадает в заострённое металлизированное волокно и на выходе сужается до размеров диафрагмы.

– Взаимное перемещение острия и образца в трёх измерениях осуществляется при помощи пьезодвижителей.

– Прошедшие через образец или отражённые и рассеянные фотоны улавливаются микрообъективом и направляются в фотоумножитель.

В нашей системе микроскоп размещен на вставке в оптический криостат optcryo 105 с диаметром шахты 60 мм и диапазоном температур 1.8–300 К.

Принцип действия микроскопа КривоСБОМ101 состоит в том, что изображение объекта строится по точкам, каждая из которых соответствует статистически усреднен-

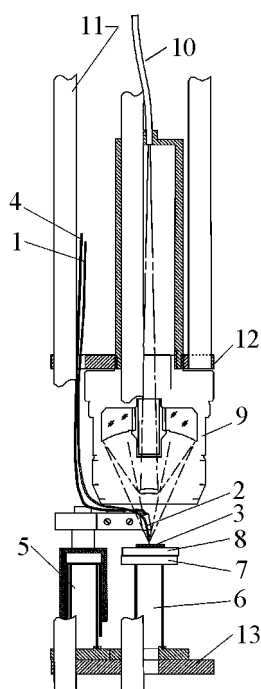


Рис. 1: Схема головки оптического микроскопа для работы в составе гелиевого криостата (пояснения в тексте).

ному отклику образца на возбуждающий лазерный луч. Величина зазора между зондом и поверхностью объекта находится в пределах 1–10 нм. Оптическая разрешающая способность такого микроскопа определяется размером острия зонда (апертурой) и составляет 30–50 нм. Кроме оптического изображения, микроскоп КриоСБОМ101 может одновременно исследовать топографию поверхности объекта (AFM-мода).

2. *Параметры системы.* В таблице 1 представлены параметры низкотемпературного сканирующего ближнепольного микроскопа.

3. *Описание прибора.* В нашей системе микроскоп размещен на вставке в криостат. Общий вид вставки показан на рис. 1, общий вид оптического криостата – на рис. 2. Источником возбуждения является лазер. Излучение заводится в волокно 1 (рис. 1). Конец волокна заострен и на его боковую поверхность нанесено отражающее покрытие – зонд 2. Для поддержания расстояния между зондом и поверхностью образца 3 используется резонатор камертонного типа. Сигнал от резонатора проходит по кабелю 4 к системе обратной связи, управляющей  $z$ -подвижкой 5. Перемещение образца вдоль осей  $x, y$  осуществляется пьезосканером 6: при подаче пилообразного сигнала система пьезосканер 6 + неподвижная сапфировая шайба 7 + подвижная сапфировая шайба

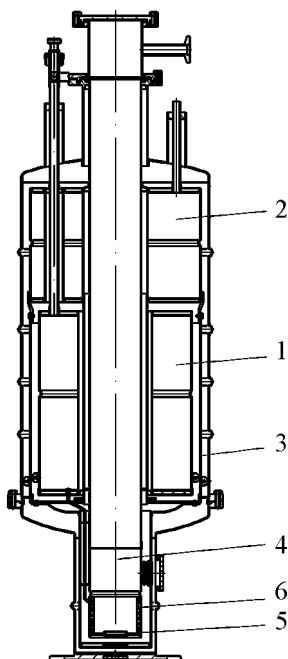


Рис. 2: Схема оптического гелиевого криостата.

8 + образец сначала сдвигается на нужное расстояние, а затем при резком спаде напряжения шайба 7 и пьезосканер возвращаются в начальное положение, а шайба 8 и образец сдвигаются.

Сигнал от образца принимается светосильным зеркальным объективом 9 и передается по многомодовому волокну 10 к ФЭУ. Программа обработки изображения содержит большой набор функций, позволяющих убрать шумы, искажающие изображение. Вся оптическая конструкция удерживается на четырех трубках из нержавеющей стали 11 и на верхнем несущем фланце 12. Система сканирования собрана на нижнем несущем фланце 13.

Получение низкой температуры обеспечивает универсальный гелиевый/азотный криостат (рис. 2). Внутри криостата находится гелиевый 1 и азотный 2 резервуары. Азотный резервуар служит для охлаждения теплового экрана 3. Жидкий хладагент подается через капилляр в нижнюю часть шахты 4 и испаряется на теплообменнике 5. Температура образца регулируется изменением потока газообразного гелия/азота и резистивным нагревателем 6 на теплообменнике. В температурном интервале 4,2–273 К образец находится в восходящем потоке гелия. Поток газа регулируется электромагнитным клапаном и дифференциальным регулятором давления, которые расположены в маностате (отдельный блок). Двухуровневая система регулировки пото-

ка газа и температуры теплообменника обеспечивает высокую точность поддержания температуры и низкий расход гелия. Температуры от 4.2 до 1.8 К достигаются откачкой паров гелия.

*Методика измерений.* Источником возбуждающего излучения является лазер. Программа управления контролирует систему позиционирования зонда (через обратную связь). Свет от люминесцирующего образца собирается объективом. С помощью фильтра отсекается возбуждающая длина волны, остальная часть регистрируется системой счета фотонов, информация от которой передается в программу управления микроскопом. Зонд перемещается к следующей точке образца. Весь процесс повторяется. Таким образом строится оптическое изображение.

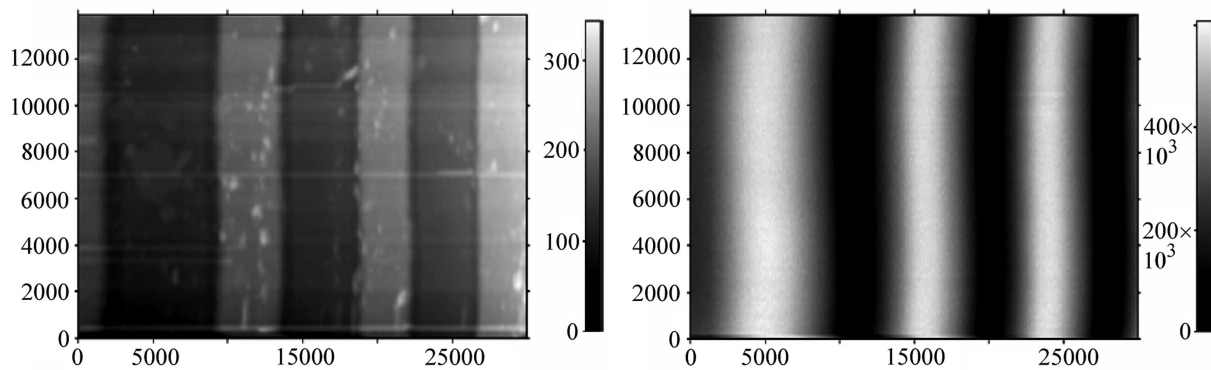


Рис. 3: Топографическое (слева) и оптическое (справа) изображение калибровочной решетки алюминия на стекле с периодом 4 мкм.

Параллельно с оптическим изображением можно получать топографию образца с помощью системы контроля расстояния зонд-поверхность (мода AFM).

*Тестовые измерения.* Первичные тестовые измерения проводились при комнатной температуре на решетках алюминия на стекле. Кроме визуализации работы микроскопа исследования решеток служили для модификации программы управления: нелинейность пьезокерамики приводит к искажению объектов. С учетом калибровки был выбран оптимальный размер поля сканирования, на котором нелинейности будут пренебрежимо малы: пьезокерамика ведет себя линейно, если размеры поля лежат в пределах 15–25 мкм в каждом направлении.

На рис. 3 представлены топографическое и оптическое изображения калибровочной решетки с периодом 4 микрона, скважность 50%. Дальнейшие эксперименты планируется проводить при низких температурах на квантовых ямах наноструктур GaAs/AlGaAs.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. W. Pohl, "Scanning near-field optical microscopy (SNOM)" In: *Advances in optical and electron microscopy*, vol. 12 (London, Academic, 1991), p. 243.
- [2] Th. Hartmann, R. Gatz, W. Wiegrabe, et al., NATO Adv. Stud. Inst. **E242**, 35 (1993).
- [3] U. Ch. Fischer, NATO Adv. Stud. Inst. **E184**, 475 (1990).
- [4] A. Harootunian, E. Betzig, M. Isaacson, and A. Lewis, Appl. Phys. Lett. **49**, 674 (1986).
- [5] U. Ch. Fischer, U. T. Durig, and D. W. Pohl, Appl. Phys. Lett. **52**, 249 (1988).
- [6] S. Bozhevolnyi, J. Opt. Soc. Am. **B14**, 2254 (1997).
- [7] H. G. Frey, F. Keilmann, A. Kriele, and R. Guckenberger, Appl. Phys. Lett. **81**, 5030 (2002).
- [8] H. D. Robinson, "Low temperature near-field spectroscopy of self-assembler quantum dots". Dissertation in Boston University Graduate School of arts and science, 2000.
- [9] X. Fan, P. Palinginis, S. Lacey, et al., Opt. Lett. **25**, 1600 (2000).
- [10] М. Н. Либенсон, "Преодоление дифракционного предела в оптике". Соросовский образовательный журнал **6**, 99 (2000).

*По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара "Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики", Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.*

Поступила в редакцию 14 июля 2010 г.