

## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.383.52 : 681.723 : 681.7.015.2

### ИНФРАКРАСНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ МИКРОСКОП С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

В. М. Базовкин, И. В. Мжельский, Г. Л. Курьшев, В. Г. Половинкин

*Учреждение Российской академии наук*

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*

*E-mail: Mzhelskii\_ivan@list.ru*

Рассматриваются технические параметры и возможные применения инфракрасного сканирующего микроскопа с пространственным разрешением до 3 мкм. Показано, что прибор работает как с матричным, так и с линейчатым типами фотоприёмных устройств. Создано оригинальное программное обеспечение для персонального компьютера, позволяющее интерактивно управлять процессом сканирования, получать и обрабатывать изображения объектов в инфракрасном диапазоне.

*Ключевые слова:* инфракрасный микроскоп, сканирующая система, программное обеспечение, фотоприёмное устройство.

**Введение.** В тепловизионном ИК-микроскопе ТИРМ-1 [1], разработанном в Институте физики полупроводников СО РАН, используется гибридное фотоприёмное устройство (ФПУ)  $128 \times 128$  элементов на основе арсенида индия (спектральный диапазон 2,5–3,1 мкм). Такие приборы активно применяются в ряде организаций Российской академии наук, например: Институте катализа СО РАН для анализа появления неоднородностей катализаторов в процессе их использования, Институте теоретической и прикладной механики СО РАН для изучения распределения температур в микротермоанемометрах, Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург) для изучения распределения температур в мощных светодиодах [2].

Дополнение данного прибора системой сканирования даёт возможность увеличить поле зрения при сохранении высокого пространственного разрешения и использовать как матричные, так и линейчатые ФПУ.

В настоящее время принято называть ИК-микроскопом обычный оптический микроскоп, дополнительно оснащённый инфракрасным фурье-спектрометром (например, многоэлементным Digilab UMA 400/600 и одноэлементными МИКРАН-3, Nicolet iN 10 MX, AIM-8800,  $\mu$ MAX) с минимальной площадью исследуемой области образца 10 мкм. Применение многоэлементных ИК ФПУ позволило нам отказаться от традиционного использования оптического микроскопа и непосредственно получать изображение в ИК-диапазоне.

Целью представленной работы является решение проблемы создания аппаратных и программных средств сканирующей инфракрасной микроскопии, позволяющей получать ИК-изображения объектов большой площади с высоким пространственным разрешением.

**Инфракрасный микроскоп** представляет собой устройство, регистрирующее ИК-излучение, спектральный диапазон которого определяется материалом ФПУ. В данной работе приведены результаты, полученные с помощью ИК-микроскопов с двумя типами гибридных ФПУ: матричным и линейчатым. Фоточувствительный материал ФПУ матричного типа — InAs, спектральный диапазон 2,5–3,1 мкм, матрица размера  $128 \times 128$  элементов; линейчатого типа — InSb, спектральный диапазон 3,0–5,4 мкм, количество

элементов 384. Фоточувствительный модуль монтируется в заливной криостат, охлаждаемый жидким азотом. Пространственное разрешение микроскопа зависит от применяемого объектива и может изменяться в пределах от 3 до 8 мкм.

**Сканирующая система.** В процессе сканирования можно перемещать ФПУ относительно объекта и наоборот. Поскольку в микроскопии размеры исследуемых объектов, как правило, малы в сравнении с размерами микроскопа, то целесообразно перемещать исследуемый объект относительно ФПУ.

Сканирующая система реализована на базе оптического микроскопа ИМЦЛ 100×50, А. Станина микроскопа оборудована предметным координатным столиком ручного позиционирования с двумя датчиками относительного положения. Для получения тепловизионных изображений большой площади вместо оптической части на станину установлен ИК-микроскоп, а предметный координатный столик моторизован шаговыми двигателями (рис. 1).

Для автоматического управления предметным координатным столиком разработана специальная электронная схема управления на основе микроконтроллера (МК) С8051F342 фирмы "SiLabs" (США), который может работать как с цифровыми, так и с аналоговыми сигналами и имеет встроенный USB-интерфейс. Такой тип МК позволил упростить схемотехническую реализацию и программу для МК. Специальное программное обеспечение (ПО) для МК по данным с датчиков положения даёт возможность контролировать текущую позицию, управлять шаговыми двигателями, отвечать на запросы ПК. Управление шаговыми двигателями осуществляется с помощью специальных микросхем-драйверов, способных дробить шаг двигателя вплоть до 1/32 и перемещать объект на 0,02 мкм за один шаг. Отрицательная обратная связь позволяет удерживать заданную позицию с точностью до 0,3 мкм.

Практика показала, что такой точности позиционирования при пространственном разрешении 3 мкм достаточно, чтобы совмещать изображения без видимых геометрических искажений. Более точное позиционирование приводит к чрезмерной чувствительности сканирующей системы к внешним источникам колебаний и возникновению автоколебаний.

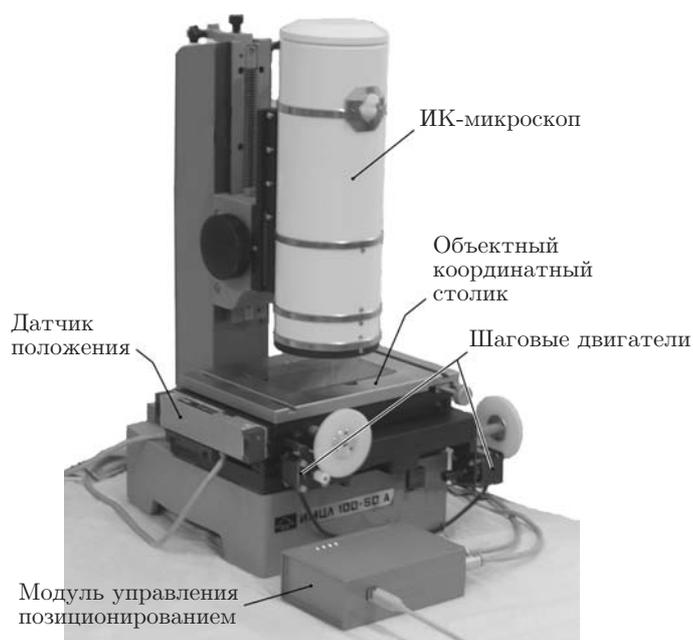
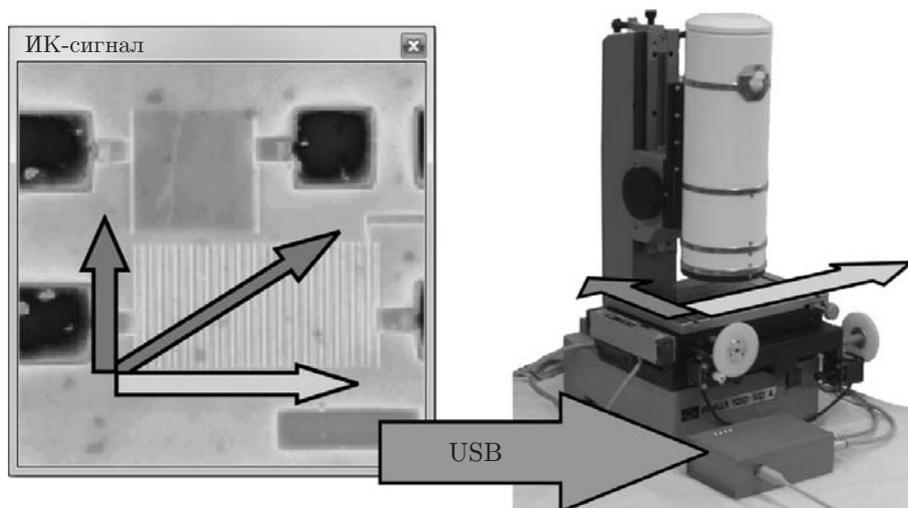


Рис. 1. Общий вид сканирующего инфракрасного микроскопа

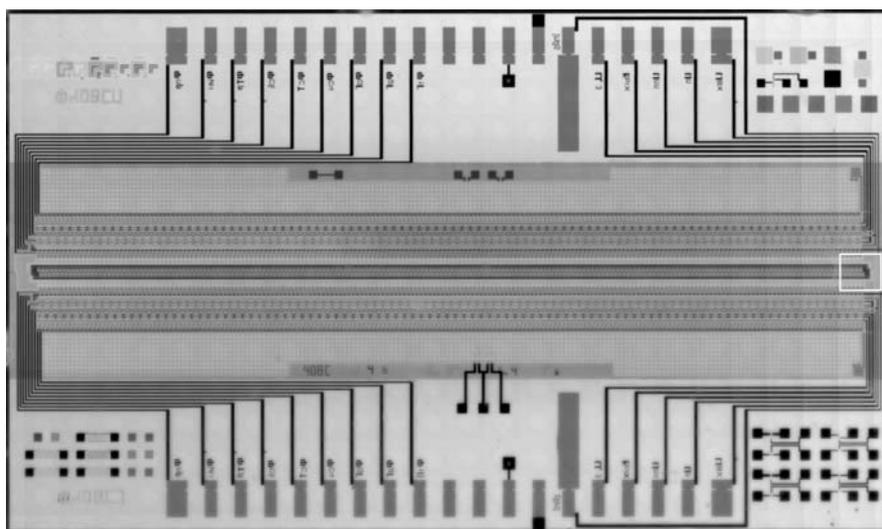


*Рис. 2.* Интерактивный принцип управления позиционированием. Изображение «захватывается» с помощью курсора компьютерной мыши и перемещается по окну «ИК-сигнал», в результате чего происходит физическое перемещение исследуемого образца

Управление процессом сканирования осуществляется с использованием разработанного ПО для ПК, которое позволяет получать, обрабатывать и сохранять информацию. ПО создано с учётом возможности работы с ФПУ как матричного, так и линейчатого типов.

Для удобства позиционирования образца реализованы интерактивный принцип управления (рис. 2), а также функция измерения расстояния между двумя точками на изображении.

**Примеры применения.** *Контроль качества гибридной сборки.* Прозрачность кремния в ИК-диапазоне даёт возможность контролировать точность совмещения микросхем, собранных методом гибридной сборки, что делает ИК-микроскоп мощным средством контроля. Тепловизионное изображение гибридной сборки линейчатого ФПУ с засветкой через



*Рис. 3.* Тепловизионное изображение линейчатого ФПУ, собранного из двух кристаллов (кремниевый мультиплексор и фотоприёмной линейки из арсенида индия) методом гибридной сборки. Вид сквозь кремниевый коммутатор. Пространственное разрешение  $3,26 \times 3,26$  мкм на один фотоприёмный элемент ФПУ, размер изображения  $3385 \times 2000$  пикселей, размер кремниевого коммутатора  $6,5 \times 10,5$  мм

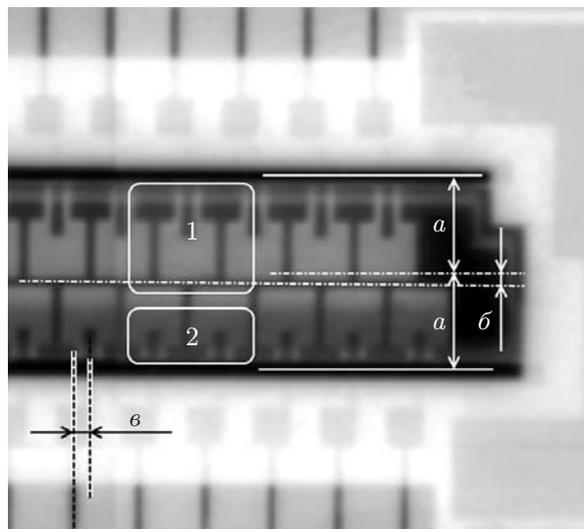


Рис. 4. Увеличенный фрагмент рис. 3: 1 — часть области бездефектного просветления, 2 — часть области технологического дефекта просветления;  $a$  — расстояния от краёв окна в кремниевом кристалле до его центральной линии,  $б$  — смещение одного кристалла относительно другого по оси  $y$ ,  $в$  — по оси  $x$ . Шаг фоточувствительных элементов в ряду составляет 50 мкм

кремниевый коммутатор [3] показано на рис. 3. Пространственного разрешения 3 мкм достаточно для того, чтобы судить о дефектах совмещения кристаллов и дефектах просветления окна в кремниевом кристалле. На увеличенном фрагменте изображения (рис. 4) можно видеть смещение площадок кристаллов относительно друг друга и локальные дефекты просветления в области над фоточувствительными элементами.

*Исследование эмиссии излучения ИК-светодиодов.* Распределение интенсивности излучения с поверхности ИК-светодиода в зависимости от пропускаемого тока представлено на рис. 5. ИК-светодиод изготовлен методом жидкофазной эпитаксии на подложке  $n$ -InAs [4]. Образец выполнен в виде мезаструктуры диаметром 300 мкм, полученной травлением и расположенной в центре чипа, и имеет круглый контакт диаметром 30 мкм на поверхности  $p$ -InAsSb(P). Спектр фоточувствительности представленного диода имеет полуширину  $\sim 0,7$  мкм и максимум при длине волны  $\sim 3,4$  мкм (300 К). Изображения регистриро-

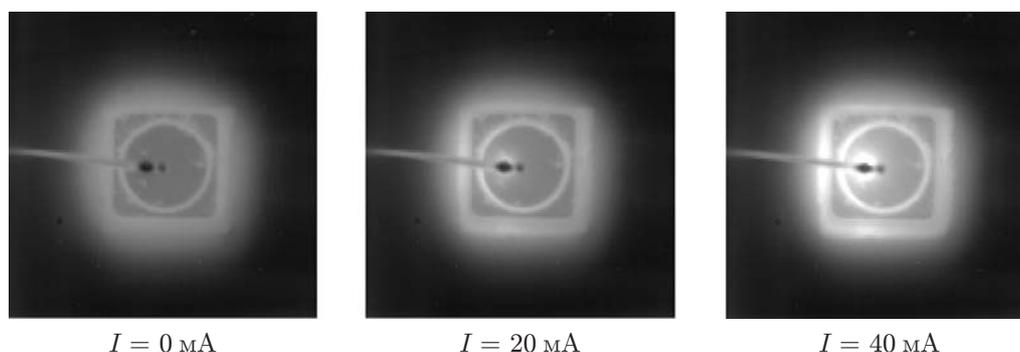


Рис. 5. Изображения ИК-светодиода, полученные с помощью микроскопа с матричным ФПУ на InAs в спектральном диапазоне 2,5–3,1 мкм. Поле зрения микроскопа  $900 \times 900$  мкм

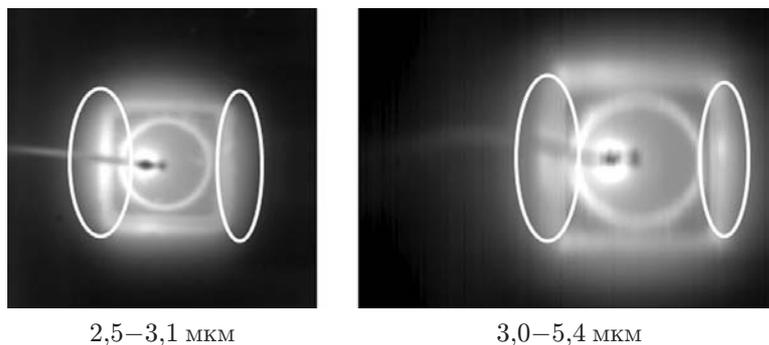


Рис. 6. Сравнение изображений, полученных в двух спектральных диапазонах при пропускании тока 50 мА с помощью микроскопа с матричным ФПУ на InAs (слева) и линейчатым ФПУ на InSb (справа). Области различия обозначены овалами

вались матричным микроскопом в спектральном диапазоне 2,5–3,1 мкм и линейчатым в спектральном диапазоне 3,0–5,4 мкм. На рисунке видна неоднородность распределения интенсивности излучения на поверхности ИК-светодиода вблизи контакта. Сравнение двух изображений, полученных в разных спектральных диапазонах при одинаковых значениях пропускаемого тока, приведено на рис. 6. Анализ результатов показал, что имеются различия в распределении интенсивности в разных спектральных диапазонах. Такая информация полезна для разработчиков и пользователей ИК-светодиодов.

**Заключение.** Предлагаемый в работе сканирующий ИК-микроскоп даёт возможность изучать специфику распределения инфракрасного излучения в микромасштабах с пространственным разрешением до 3 мкм и точностью сканирования 0,3 мкм. Использование линейчатого ФПУ на основе InSb позволило расширить спектральный диапазон до 5,4 мкм.

Возможность визуализации как больших, так и малых объектов в ИК-диапазоне в сочетании с высоким пространственным разрешением создаёт перспективы применения данного прибора в области контроля пространственного распределения температур и тепловой ёмкости элементов в органической и неорганической химии, биологии, исследовании полимеров и сорбентов, разработке микроэлектромеханических систем, таких как микро-реакторы, микротеплообменники, микроприводы, микросенсоры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гузев А. А., Ковчавцев А. П., Ларшин А. С. и др.** Тепловизионный микроскоп // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 97–102.
2. **Черняков А. Е., Закгейм А. Л., Половинкин В. Г. и др.** Исследование тепловых процессов в мощных InGaN/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии // ФТП. 2010. 44, № 3. С. 390–396.
3. **Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А. и др.** Многоэлементные гибридные ИК ФПУ на основе приборов с зарядовой инжекцией. Ч. II. Тепловизионные системы с элементами на InAs // Автометрия. 2007. 43, № 4. С. 36–49.
4. **Matveev B. A., Ankudinov A. V., Zotova N. V. et al.** Properties of mid-IR diodes with n-InAsSbP/n-InAs interface // Proc. SPIE. 7597. P. 75970G.1–75970G.9.

Поступила в редакцию 15 июля 2011 г.