Система для определения параметров переноса полупроводниковых материалов

Г. Х. Христакудис, В. Д. Вылчев

(Резюме)

На основе модульного промышленного контроллера МПК-Е создан комплекс для автоматического измерения электропроводности, коэффициентов Холла, Зеебека, поперечного эффекта Нернста-Этингсхаузена и теплопроводности полупроводниковых материалов и для определения ряда связанных с ними величин.

Хардуэрная часть системы состоит из модульного промышленного контроллера МПК-Е со вставными модулями, коммутационного блока, измерительного блока и блоков для проведения температурных измерений.

Софтуэрная часть системы имеет оверлэйную структуру и из-за своего большого объема разделена на две части: для управления экспериментом и для обработки полученных результатов.

Система работает реальное время и с унифицированной входной и измерительной частью. Это создает максимально хорошие условия для проведения экспериментов.

Сканирующий туннельный микроскоп

*П. Р. Станков, С. И. Васильев**

Институт электроники Болгарской академии наук, 1784 София,
**Московский государственный университет, Москва*

В работе описана конструкция высокостабильного сканирующего туннельного микроскопа с механическим перемещением исследуемого образца к зондирующему эмиттеру, который обладает разрешением по нормали к плоскости сканирования $\delta z \leq 0{,}3$ Å и вдоль плоскости $\{x, y\}$ ~3—4 Å.

Создание сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) швейцарскими физиками Г. Биннингом и Х. Рорером в 1982 г. [1] положило основы микроскопии большого класса материалов с атомным разрешением [2—8].

В основу этого метода исследования поверхности твердых тел, позволяющего анализировать ее микротопографию и локальную плотность электронных состояний в атомных масштабах, положено явление туннелирования электронов между исследуемой поверхностью и подводимой к ней на расстоянии $z \leq 10$ Å зондирующим проводящим эмиттером малого радиуса. Высокое разрешение метода ($\delta z \leq 0{,}1$ Å вдоль нормали к исследуемой поверхности и 2—3 Å вдоль поверхности) достигается за счет экспоненциальной зависимости туннельного тока $I_т$ от z:

$$I_т \sim (U_т/z) \exp(-A\varphi^{1/2} z), \tag{1}$$

здесь $A = 1{,}025$ (eV)$^{-1/2}$ Å^{-1}; φ — средняя высота барьера над уровнем Ферми этого электрода с учетом сил изображения; $U_т$ — разность потенциалов на электродах ($eU_т < \varphi$); z — ширина барьера при энергии, отвечающей уровню Ферми электродов, находящегося под отрицательным потенциалом.

В работе описана новая конструкция высокостабильного СТМ с механическим перемещением исследуемого образца к зондирующему эмиттеру, который обладает разрешением по нормали к плоскости сканирования $\delta z \leq 0{,}3$ Å и вдоль плоскости

$\{x, y\} \sim (3-4)$ Å и большим диапазоном перемещения исследуемого образца к зондирующему эмиттеру до 10 mm.

Блок-схема СТМ приведена на рис. 1. Основной частью СТМ служит программно-управляемое устройство, позволяющее сканировать эмиттером над поверх-

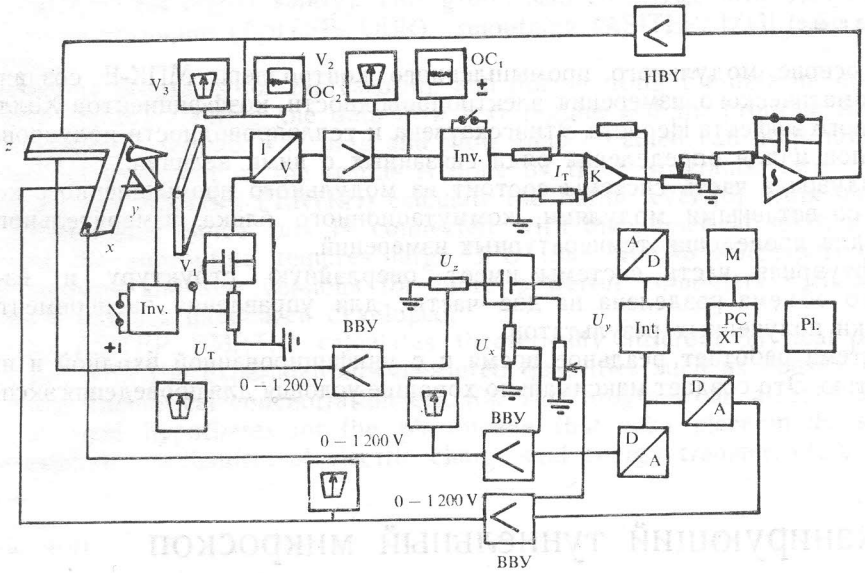

Рис. 1. Блок-схема СТМ

ностью образца. Его конструкция приведена на рис. 2. Механическое основание СТМ (*1*) выточено из куска плавленого кварца с размерами $90 \times 90 \times 60$ mm³. Его конструкция обеспечивает большую механическую жесткость и маленький температурный дрейф в результате уменьшения температурных градиентов. Манипулятор точных перемещений (МТП) (*2*) служит для сканирования эмиттера вдоль поверхности $\{x, y\}$ и для управления расстоянием между зондирующим эмиттером (*3*) и исследуемой поверхностью образца. Он изготовлен из трех взаимноперпендикулярных пьезокерамических стержней с размерами $40 \times 4 \times 3$ mm³, сплавленных в вершине, и составляет монолитную конструкцию. Коэффициенты преобразования пьезокерамических стержней, измеренные емкостным дилатометром, $K_j = (21 \pm 0{,}4)$ Å/V для диапазона (0—1200) V. Низшая частота колебаний конструкции $\sim$2,4 kHZ. Основание для грубых перемещений исследуемых образцов (*5*), которое также обеспечивает крепление образцов, изготовлено из куска кварца размерами $40 \times 50 \times 4$ mm³ и при помощи трех ножек (*6*) из кварца расположено сверху на механическом основании СТМ. В созданном нами СТМ предусмотрен манипулятор грубых перемещений (МГП) образца к зондирующему эмиттеру, при помощи которого осуществляется перемещение образца от 10 mm до осуществления туннельного режима (10—20) Å — расстояние между исследуемым образцом и зондирующим эмиттером. При этом не нарушается целостность поверхностей исследуемых образцов и зондирующего эмиттера. При помощи винта (*7*), к которому прикреплена опорная точка рычага (*8*), образец передвигается грубо в направлении z до 10 mm. При помощи дифференциального винта (*9*) (шаг 0,05 mm) и рычага (*8*) осуществляется возможность передвижения образца с шагом 10—300 Å (отношение длин плечей рычага $l_1/l_2 > 20$). Кроме этого, в предлагаемой конструкции для передвижения образца предусмотрена биаморфная пластина (*10*), которая реализована из двух специально металлизированных

и сплавленных между собой пьезокерамических пластин. При ее помощи осуществляется возможность передвижения исследуемого образца в рамках от 10 Å до >0,01 mm путем изменения электрического потенциала электродов биаморфной пластины. После осуществления туннельного режима (т.е. расстояние между зонди-

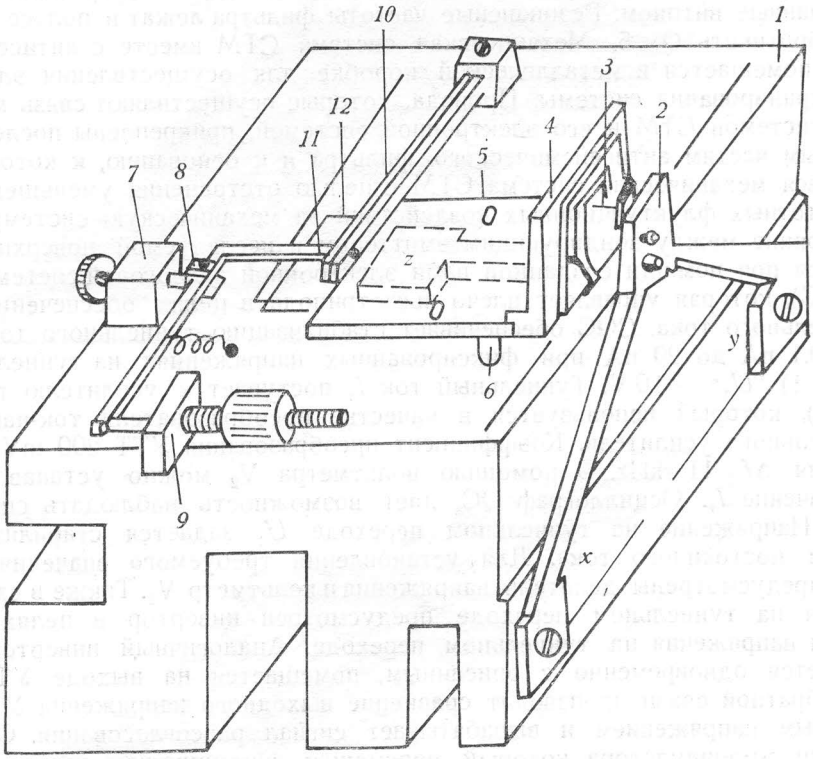

Рис. 2. Конструкция механической системы СТМ

рующим эмиттером и исследуемой поверхностью ~5—20 Å) при помощи винта (*7*) или через изменение потенциала биаморфной пластины образец освобождается от механической системы подачи образца, т.е. от возможных флуктуационных воздействий. При помощи штифта (*11*), петли (*12*) и винта (*7*) существует возможность отодвигания образца от зондирующего эмиттера до 10 mm.

Жесткие требования предъявляются к зондирующему эмиттеру СТМ, радиус которого является ключевым фактором для получения высокого пространственного разрешения. Кроме предельно малого радиуса, острие должно иметь на вершине кластеры атомов, играющие роль микроострий, и одновременно обладать высокой механической жесткостью для того, чтобы тепловые флуктуации и механические колебания не превышали допустимых величин. В целях получения зондирующих эмиттеров с малым радиусом острия в сочетании с их высокой жесткостью при их изготовлении использована методика ступенчатой вытяжки эмиттера при электрохимическом травлении [9]. Травление проводилось в двухмолярном растворе NaOH на постоянном токе ($U=5$—10 V, $I=150$ mA). Полученные острия имеют радиус ~150 Å при приемлемых величинах квантовых $X_q \sim 5 \cdot 10^{-13}$ m и тепловых $X_т = 3 \cdot 10^{-12}$ m флуктуаций ($X_q^2 = \hbar\omega/K_м$; $X_т^2 = kT/K_м$; k — постоянная Больцмана; $\omega = K_м/m$ — эквивалентная масса колебательной системы). Для формирования на вершине острия кластера атомов до начала работы СТМ эмиттер приближается к поверхности

образца и на него подается импульс напряжения порядка 10 V. Таким же образом удается восстановить поверхность зондирующего эмиттера после его соприкосновения с поверхностью образца.

Механическое основание СТМ смонтировано на многозвенном антисейсмическом фильтре. Он состоит из пяти металлических дисков, витоновых прокладок, пружины, демпфированные витоном. Резонансные частоты фильтра лежат в полосе 3—10 Hz и имеют добротность $Q \leq 5$. Механическая система СТМ вместе с антисейсмическим фильтром помещается в металлической коробке для осуществления электростатического экранирования системы. Провода, которые осуществляют связь между механической системой СТМ и его электронной системой, прикреплены последовательно к отдельным частям антисейсмического фильтра и к основанию, к которому смонтирована вся механическая система СТМ с целью отстранения уменьшения влияния высокочастотных флуктуационных воздействий на механическую систему.

Расстояние между зондирующим эмиттером и исследуемой поверхностью контролируется при помощи созданной нами электронной аналоговой системы обратной связи (СОС), которая управляет плечо пьезотрипода в целях обеспечения постоянного туннельного тока. СОС обеспечивает стабилизацию туннельного тока $I_т$ в пределах от 0,1 nA до 20 nA при фиксированных напряжениях на туннельном переходе (рис. 1) "$U_т$" ≤ 10 V. Туннельный ток $I_т$ поступает к усилителю туннельного тока (УТТ), который используется в качестве преобразователя ток-напряжение и предварительного усилителя. Коэффициент преобразования УТТ 200 mV/nA, полоса пропускания $\Delta f = 11$ kHz. С помощью вольтметра V_2 можно устанавливать требуемое значение $I_т$. Осциллограф OC_1 дает возможность наблюдать спектральный состав $I_т$. Напряжение на туннельном переходе $U_т$ задается стабилизированным источником постоянного тока. Для установления требуемого значения $U_т$ и его контроля предусмотрены делитель напряжения и вольтметр V_1. Также в схеме подачи напряжения на туннельном переходе предусмотрен инвертор в целях изменения полярности напряжения на туннельном переходе. Аналогичный инвертор, который переключается одновременно с описанным, помещается на выходе УТТ в СОС. Система обратной связи производит сравнение выходного напряжения УТТ с заданным опорным напряжением и вырабатывает сигнал рассогласования. Он подается на обкладки z-манипулятора, который, перемещая зондирующее острие, устраняет

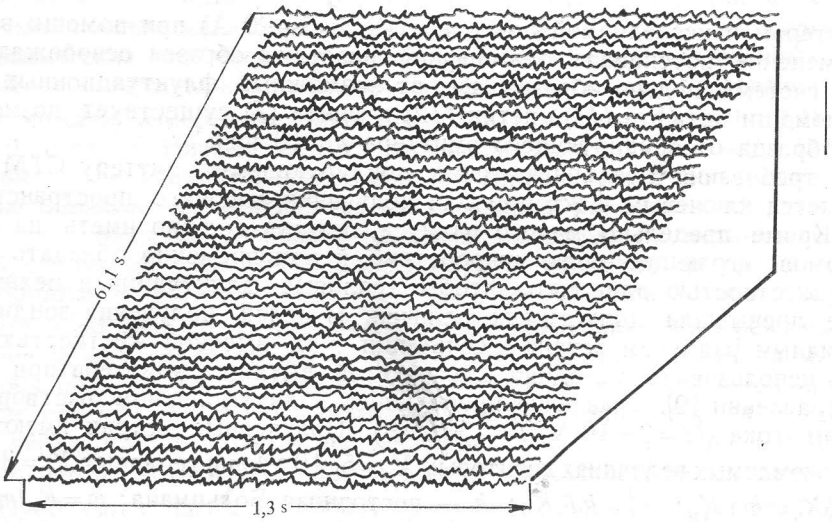

Рис. 3. Шумовая запись СТМ

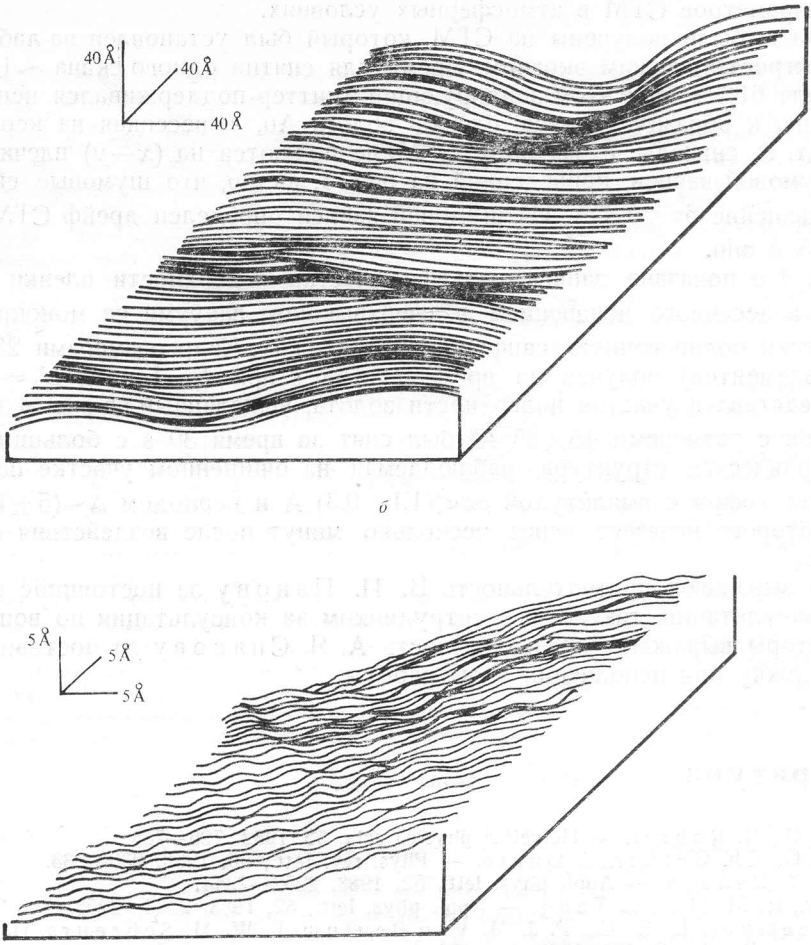

Рис. 4. Запись рельефа поверхности пленки золота

отклонение выходного сигнала УТТ от опорного. Постоянная времени цепи стабилизации тока $\tau = 10^{-3}$ s (полоса частот стабилизации $\Delta f_c = 1$ kHz). Сигнал с выхода СОС подается также на АЦП и затем обрабатывается ЭВМ. Выходные напряжения СОС $|U_z| \leq 13$ V и высоко-вольтного усилителя (ВВУ) $U_z^{max} = 1200$ V подаются на противоположные обкладки z-манипулятора. Это позволяет с помощью изменения напряжения на выходе ВВУ устанавливать СОС на середину рабочего диапазона, т. е. компенсировать передвижением z-манипулятора сигнал рассогласования, регистрируемый вольтметром V_3. С помощью осциллографа OC_2 можно наблюдать профиль рельефа поверхности в процессе сканирования. ВВУ служат для увеличения амплитуды развертки сканирования, задаваемой ЭВМ посредством ЦАП, до требуемых величин и для установления зондирующего острия в начальную точку сканирования. Для установления начальных координат сканирования на входы ВВУ подаются стабилизированные регулируемые сигналы. Регулировка производится с помощью потенциометров "U_x" и "U_y". Стабилизированное напряжение в 10 V с точностью до 1 mV обеспечивается источником опорного напряжения. Величины U_j^{max} определяют максимальное поле сканирования СТМ $\Delta x + \Delta y + \Delta z \sim 2{,}5 \times 2{,}5 \times 2{,}5$ μm³.

На рис. 3 приведена запись, характеризирующая разрешение и временную стабильность параметров СТМ в атмосферных условиях.

Результаты были получены на СТМ, который был установлен на лабораторном столе с электростатическим экраном. Время для снятия одного скана ~1,3 s. Сняты 47 сканов для 61,1 s, при этом зондирующий эмиттер поддерживался неподвижным по отношению к образцу (тонкая пленка золота Au, нанесенная на керамическую подложку), т. е. сигналы с выходов ВВУ не подаются на (x—y) плечи пьезотрипода. Из шумовой записи, приведенной на рис. 3, видно, что шумовые сканы определяют разрешение $\delta z \leq 0{,}3$ Å. Из шумовой записи определен дрейф СТМ по оси z, который ≤ 5 Å/min.

На рис. 4 *а* показана запись рельефа участка поверхности пленки золота Au ($d \sim 800$ Å), нанесенного испарением в сверхвысоком вакууме на монокристаллическую оптически полированную сапфировую подложку. Кадр размерами 250×250 Å^2 (128×128 элементов) получен за время $t = 168$ s при $I_т = 1$ n A, $U_т = 10$ mV. На рис. 4 *б* представлен участок поверхности золота, выделенный на рис. 4 *а* линиями. Этот участок с размерами 45×45 Å^2 был снят за время 30 s с большим разрешением. Периодическая структура, наблюдаемая на очищенном участке поверхности, соответствует гофру с амплитудой $\delta z < (1{,}1 \pm 0{,}3)$ Å и периодом $\Delta \sim (5 \pm 1{,}5)$ Å, изображение которого исчезает через несколько минут после воздействия с атмосферой воздуха.

Авторы выражают признательность В. И. Панову за постоянное внимание к работе и консультации, так же его сотрудником за консультации по вопросам технологии. Авторы выражают признательность А. Я. Спасову за постоянное внимание и поддержку при исполнении этой работы.

Литература

1. Binning, G., H. Rohrer. — Helvetica physica acta, 55, 1982, 726—735
2. Binning, G., Ch. Gerber, C. Quate. — Phys. rev. lett., 56, 1986, 930—933.
3. Sarid, D., T. Henson. — Appl. phys. lett., 52, 1988, 2252—2254.
4. Bryant, P., R. Miller, R. Yang. — Appl. phys. lett., 52, 1988, 2233—2235.
5. Van de Leemput, L. E. C., P. J. M. Van Bentum, L. W. M. Schreurs, H. Van Kempen. — Physica C, 152, 1988, 99—104.
6. Kirk, M. D., et al. Appl. phys. lett., 152, 1988, 2071—2073.
7. Васильев, С. И., В. Б. Леонов, В. И. Панов, С. В. Савинов. — ДАН, 297, 1987, 1350—1354.
8. Голубок, А. О., и др. — Письма в ЖТФ, 14, 1988, 942—945.
9. Алекперов, С., С. Васильев, С. Молчанов. — Вестн. Моск. у-та., Сер. 3, Физика и астрономия, 29, 1988, 87—89.

Поступила в редакцию 6 декабря 1988 года

Scanning Tunneling Microscope

P. R. Stankov, S. I. Vasilev

(Summary)

In this paper we describe our new construction of a high-stability scanning tunneling microscope with a mechanical shift of the investigated object towards the emitting probe which has a vertical resolution of $\delta z \leq 0.3$ Å and a horizontal resolution $\{x, y\} \sim 3$—4 Å.