

- Интегральные схемы на основе GaAs [11].
- Кремниевые полевые транзисторы с квантовыми точками Ge в канале [12].
- Фоточувствительные матричные модули инфракрасного (ИК) диапазона (3–5 мкм) на основе гетероперехода GeSi/Si [13].
- ИК лазеры с вертикальным резонатором мощностью до 20 Вт в импульсе и длиной волны 0,95 мкм [14].
- Матричные ИК (5 мкм) фотоприемники на пленках CdHgTe [15].

4. Заключение

Работа выполняется при поддержке Государственной программы "Ведущие научные школы РФ" (грант 00-15-96806), а также программ "Перспективные технологии и приборы для микро и наноэлектроники" (проект 02.04.1.1) и "Фундаментальные космические исследования" (проект "Эпитаксия").

Список литературы

1. Arthur J R, LePore J J. *Vac. Sci. Technol.* **6** 545 (1969)
2. Cho A Y J. *Vac. Sci. Technol.* **8** S31 (1971)
3. Денисов А Г, Кузнецов Н А, Макаренко В А *Обзоры по ЭТ. Серия "Технология, организация производства и оборудование"* Т. 17 (М.: ЦНИИ Электроника, 1981)
4. Майоров А А *Научное приборостроение* **1** 114 (1991)
5. Блинов В В, Потемкин Г А, Пчеляков О П и др., Автор. свид. "Устройство для молекулярно-лучевой эпитаксии" № 1487517 (1989)
6. Архипенко А В, Бломкина Ю А, Пчеляков О П и др. *Поверхность. Физика, химия, механика* **1** 93 (1985)
7. Спесивцев Е В, Рыхлицкий С В, Назаров Н И и др., в сб. *Материалы IV Росс. конф. "Полупроводники-99"* (Новосибирск, 1999) с. 289
8. Pchelyakov O P, Nikiforov A I, Sokolov L V et al., in *Proc. X Symp. on Physical Sciences in Microgravity* Vol. II (St. Petersburg, 1997) p. 144
9. Ignatiev A *Earth Space Rev.* **2** 10 (1995)
10. Бержатый В И, Зворыкин Л Л, Иванов А И, Пчеляков О П и др. *Автоматическая сварка* **10** 108 (1999)
11. Преображенский В В, Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук (Новосибирск: ИФП СО РАН, 2000)
12. Yakimov A I et al. *Phys. Rev. B* **59** 12598 (1999)
13. Машанов В И, Чистохин И Б, Зайцев Б А, Пчеляков О П и др. *Микроэлектроника* **27** 412 (1998)
14. Гайслер В А, Торопов А И, Бакаров А К и др. *Письма в ЖТФ* **25** 40 (1999)
15. Sidorov Yu G et al. *Thin Solid Films* **306** 253 (1997)

PACS numbers: 07.20.Mc, 07.79.-v, 07.79.Cz, 68.35.Bs

Низкотемпературная сканирующая туннельная микроскопия

В.С. Эдельман

Начало работам по сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии в СССР было положено М.С. Хайкиным, создавшим первый в стране СТМ [1] вскоре после изобретения в 1982 г. этого прибора Биннигом и Рорером. В его лаборатории была создана серия микроскопов различного назначения [2]: СТМ с большим полем зрения, совместимый с растровым электронным микроскопом [3]; простой высоковакуумный СТМ [4]; высоковакуумный СТМ с позиционирова-

нием острия в диапазоне нескольких мм по трем координатам [5]; низкотемпературный СТМ, погружаемый в транспортный дьюар с жидким гелием [6].

Логическим развитием этих работ стало создание криогенной высоковакуумной установки для проведения сканирующей туннельной микроскопии [7, 8]. Необходимость проведения низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии связана, в первую очередь, с тем, что многие явления и процессы, такие как сверхпроводимость, переход в состояние с волнами зарядовой плотности, магнитное упорядочение, сорбция газов и т.п., реализуются при глубоком охлаждении. Охлаждение образца позволяет устранить тепловые флуктуации границ атомных террас, в ряде случаев ярко выраженные уже при комнатной температуре [9]. Но и для тех исследований, которые, в принципе, можно проводить и при комнатной температуре, охлаждение СТМ до гелиевых температур оказывается полезным, так как в этом случае практически устраняется тепловой дрейф прибора.

Известные низкотемпературные высоковакуумные установки, как правило, базируются на дорогих промышленных системах сверхвысокого вакуума, дополненных криогенными вставками (см. обзор [10]). Мы пошли по другому пути, разместив СТМ в полости, стенки которой охлаждены до температуры жидкого гелия, что автоматически решает задачу получения сверхвысокого вакуума. Предложенное нами решение позволяет не только обеспечить необходимые условия проведения экспериментов, но и исключить проблему плохого теплового контакта образца с ванной жидкого гелия путем напуска газообразного гелия в камеру. Присутствие гелия, согласно нашим наблюдениям, не сказывается на результатах экспериментов по сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии.

В установке используется СТМ [5] с держателем образца, позволяющим нагревать его *in situ* до 500–600 К при мощности нагревателя порядка 1 Вт [11]. Для отвода тепла от микроскопа при длительном отжиге используются медный теплопровод и механический тепловой ключ, замыкающийся на ванну с жидким азотом. Тем самым тепловая нагрузка на ванну с жидким гелием может быть снижена до допустимого уровня в 0,1–0,2 Вт.

Установка использовалась для изучения структуры поверхности висмута, раскалываемого *in situ*. Было обнаружено, что при раскалывании кристалла при низких температурах, как правило, возникают атомно-гладкие террасы с прямыми границами, направленными строго вдоль атомных рядов [12, 13]. Это свидетельствует об "инерции" движения границы террасы в процессе разрушения кристалла.

Оказалось, что атомно-гладкие участки не обладают строгой трансляционной симметрией — на атомную картину накладываются вариации рельефа со случайной структурой и с характерными размерами в плоскости в несколько межатомных расстояний. При этом вольт-амперные характеристики меняются от точки к точке на поверхности. Это позволяет утверждать, что плотность электронных состояний не постоянна. По-видимому, эти особенности связаны с подповерхностными дефектами, рождающимися в процессе разрушения кристалла [14]. Неоднородность поверхности сохраняется и при нагреве образца почти до плавления, что позволяет оценить

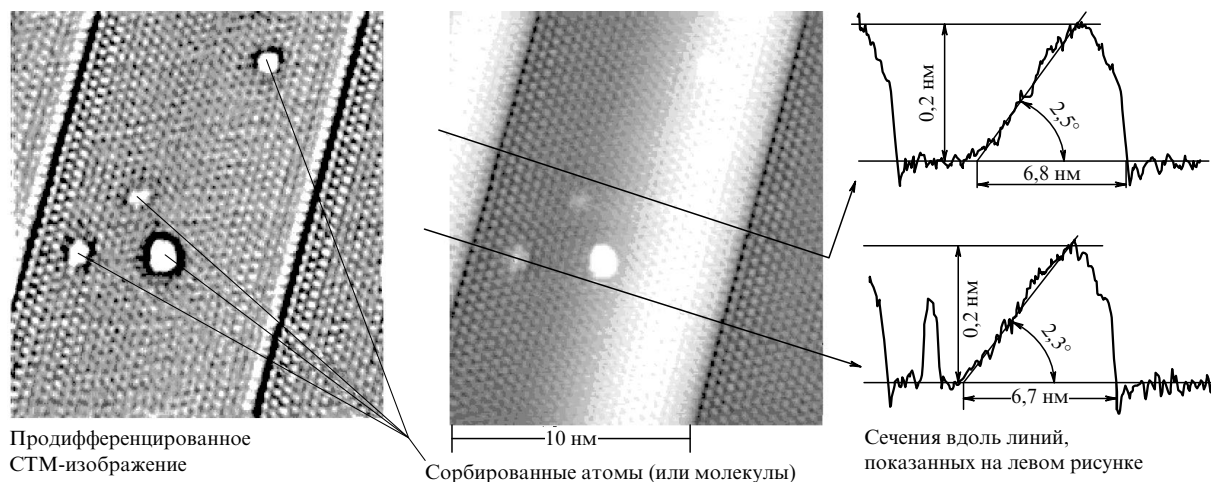


Рисунок. STM-изображение участка поверхности висмута с двойниковой микропрослойкой (в центре). Для того чтобы подчеркнуть атомную структуру, изображение было подвергнуто двумерному фурье-преобразованию, компоненты спектра, отвечающие атомной структуре, умножены на 4 и выполнено обратное фурье-преобразование. Слева: продифференцированное исходное изображение, на котором атомная структура четко проявлена и без фурье-обработки. Справа: сечения изображения вдоль соответствующих линий. Одно из них проходит через сорбированный атом, что позволяет оценить аппаратную функцию STM. Наклон плоского участка прослойки с точностью до погрешности измерений совпадает с углом, который должен быть между тригональной плоскостью скола и плоскостью выхода двойника. Это позволяет утверждать, что прослойка двойниковая.

энергию активации дефектов на уровне 1,5–2 эВ. Такие величины характерны для вакансий.

Наиболее интересное и неожиданное явление — появление двойниковых микропрослоек квантованной ширины (см. рисунок). Их ширина определяется тем, что атомные слои в прослойке, наклоненные на малый ($2,34^\circ$) угол к слоям в остальном кристалле, ориентированным перпендикулярно тригональной оси, "сшиваются" на границах. И только самый верхний слой, "сшивающийся" с матрицей с одной стороны, образует ступеньку высотой 0,2 нм с другой стороны [15, 16]. Согласно измерениям вольт-амперных характеристик, в области шириной в один-два атомных ряда вблизи ступеньки формируется одномерный проводник с существенно большей концентрацией электронов проводимости, чем на остальной поверхности. Аналогичное явление наблюдается и вблизи границ обычных террас.

Список литературы

1. Хайкин М С *ПТЭ* (1) 161 (1989)
2. Хайкин М С, Володин А П, Трояновский А М, Эдельман В С *ПТЭ* (4) 231 (1987)
3. Володин А П, Степанян Г А, Хайкин М С, Эдельман В С *ПТЭ* (5) 185 (1989)
4. Эдельман В С *ПТЭ* (4) 149 (1989)
5. Edelman V S et al. *J. Vac. Sci. Technol. B* 9 618 (1991)
6. Альтфедер И Б, Володин А П, Хайкин М С *ПТЭ* (5) 188 (1989)
7. Хлюстикова И Н, Эдельман В С *ПТЭ* (1) 158 (1996)
8. Edelman V S, Khlyustikov I N *Czech. J. Phys. Suppl. Pt. S5* 46 2839 (1996)
9. Трояновский А М, Эдельман В С *Письма в ЖЭТФ* 60 104 (1994)
10. Володин А П *ПТЭ* (6) 3 (1998)
11. Эдельман В С *ПТЭ* (4) 203 (1994)
12. Трояновский А М, Эдельман В С *Поверхность* (2) 51 (1998)
13. Трояновский А М, Эдельман В С *Кристаллография* 44 336 (1999)
14. Трояновский А М, Эдельман В С *ЖЭТФ* 115 2214 (1999)
15. Edelman V S *Phys. Lett. A* 210 105 (1996)
16. Edelman V S et al. *Europhys. Lett.* 34 115 (1996)

PACS numbers: 79.60.Jv, 79.70. + q, 85.45.-w, 85.60.Pg

Автоэмиссионные катоды (холодные эмиттеры) на нанокристаллических углеродных и наноалмазных пленках (физика, технология, применение)

А.Т. Рахимов

Автоэмиссионным катодом называется источник электронов, принцип работы которого основан на явлении автоэлектронной эмиссии, т.е. на туннелировании электронов через потенциальный барьер на границе раздела твердое тело – вакуум под действием приложенного электрического поля. Вероятность такого туннелирования определяется высотой потенциального барьера (работой выхода электрона) и величиной приложенного электрического поля. Работа выхода определяется фундаментальными свойствами материала и для большинства металлов составляет 4–5 эВ, при этом для получения необходимых для практических применений токов эмиссии требуются напряженности электрического поля порядка 10^7 В см⁻¹.

Для получения столь больших напряженностей, как правило, используют эффекты усиления электрического поля на микроостриях. Поэтому традиционным направлением в разработке автоэмиссионных катодов является создание поля идентичных микроострий на поверхности металлического или кремниевого катодов [1]. В настоящее время целый ряд лабораторий мира развивает этот подход, используя те или иные вариации создания микроострийных структур. Однако данное направление имеет весьма существенный недостаток, заключающийся в том, что производство микроострийных структур требует субмикронной технологии со всеми вытекающими отсюда последствиями. Кроме того, исполь-