

05;11;12

©1993

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА
В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ InP
МЕТОДАМИ
СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ
МИКРОСКОПИИ
В АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ**

А.В. Анкудинов, И.Э. Беришев, П.М. Солнцев, А.Н. Титков

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) позволяет с нанометровым разрешением исследовать состав и электронные свойства современных низкоразмерных полупроводниковых структур. Возможности СТМ наилучшим образом раскрываются в условиях сверхвысокого вакуума. Однако для ускорения измерений часто необходимы исследования в обычных атмосферных условиях. В этом случае проведению эксперимента мешает присутствующий на поверхности полупроводниковых кристаллов толстый слой естественного окисла. Эту трудность можно обойти с помощью химической пассивации поверхности, суть которой состоит в травлении слоя окисла и последующем нанесении вместо него тонкой (порядка нескольких монослоев) однородной по толщине и стехиометрическому составу пленки изолятора. Она предохраняет поверхность от повторного окисления и одновременно не препятствует СТМ измерениям. Для пассивации поверхностей III-V может применяться обработка в водных растворах серосодержащих соединений [1]. Эти методики хорошо разработаны для кристаллов GaAs и твердых растворов на их основе. Например, обработке в $P_2S_5/(NH_4)_2S$ позволяет визуализировать гетерограницы в сверхрешетке GaAs/GaAlAs с пространственным разрешением лучше 10 нм [2].

В настоящей работе были предприняты усилия по СТМ визуализации границ раздела в слоистых структурах на основе InP. Была опробована простая пассивация в водном растворе Na_2S . Исследовались сколы двух гетероструктур: $n\text{-InP}/p\text{-InP}/p^+\text{-In}_{0.84}\text{Ga}_{0.16}\text{As}_{0.34}\text{P}_{0.66}$ и $n^+\text{-InP}/n^-\text{-InP}/n^-\text{-Al}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{As}/n^-\text{-InP}$. Проведенные СТМ исследования позволили визуализировать все слои гетероструктур. При этом было достигнуто разрешение в плоскости скола лучше 30 нм.

Первая из исследованных гетероструктур была выращена методом ЖФЭ путем нанесения на подложку n -InP ($n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) последовательно слоев p -InP ($p = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) толщиной 2000 нм и p^+ InGaAsP ($p = 10^{19} \text{ см}^{-3}$) толщиной 1000 нм, легированных кадмием. Вторая гетероструктура была выращена MOCVD методом на подложке n^+ -InP ($n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Нарощенные слои специально не легировались, их толщина составляла: первый слой n^- -InP — 400 нм, слой AlInAs — 500 нм, второй слой n^- -InP — 300 нм. Пассивация проводилась сразу же после скола в свежеприготовленном 2.4 М водном растворе $\text{Na}_2\text{S} \times 9\text{H}_2\text{O}$ при температуре 60°C , в течение 10 с.

Точная установка иглы сканирующего туннельного микроскопа над местом выхода очень тонких слоев на самом краю сколов является трудной задачей. Для ее решения была разработана специальная модель СТМ, позволяющая перемещать образец под иглой непосредственно в туннельном контакте. Для этого образец помещался на мощную линейную пружину вблизи ее закрепленного конца. Воздействием на свободный конец пружины можно было плавно перемещать образец с точностью 50 нм. Первоначально образец устанавливался таким образом, чтобы игла находилась в 10–15 мкм от его края. Затем движением образца игла приближалась к исследуемым слоям.

Все топографии записывались в режиме постоянного тока. Для записи вольт-амперных характеристик (ВАХ) петля поддержания постоянного тока разрывалась. Иглы микроскопа приготавливались электролитическим перетравливанием вольфрамовой проволоки толщиной 0.1 мм. Радиус закругления конца иглы контролировался в электронном микроскопе и не превышал 0.1 мкм.

На рис. 1 приведено СТМ изображение пассивированной поверхности скола образца n -InP/ p -InP/ p^+ -InGaAsP. СТМ изображение поверхности является отображением двух факторов: реального рельефа поверхности и изменений в проводимости разных точек поверхности, в частности, из-за локальной флуктуации свойств пассивирующего покрытия. Степень шероховатости СТМ изображения на рис. 1 на уровне 3 нм характеризует гладкость исходного скола и однородность пассивирующего покрытия. Как оказалось, искомые слои гетероструктуры имеют разную высоту в СТМ изображении, что обеспечило их визуализацию. Очень большой перепад высот соседних слоев до 60 нм при ширине туннельного зазора между поверхностью и иглой менее 1 нм трудно объяснить изменением электронных свойств этих слоев. Более естественно связать отличие

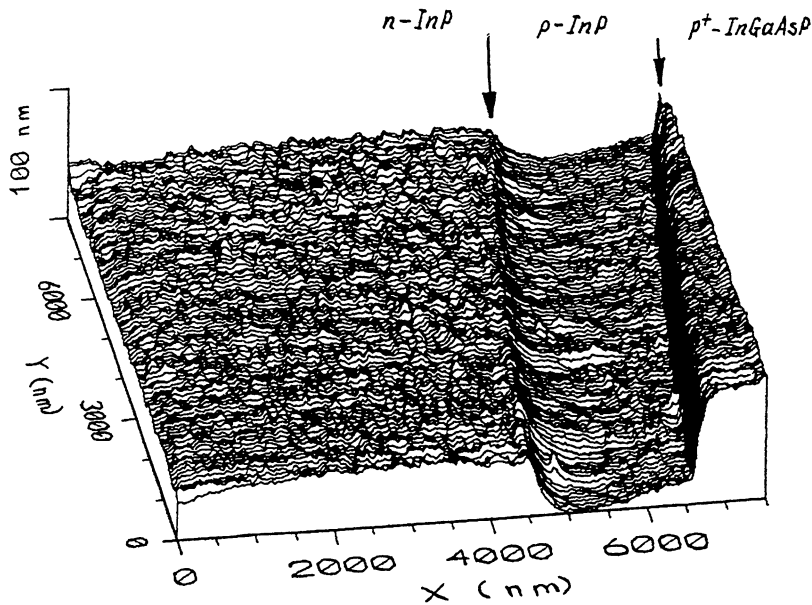


Рис. 1. СТМ изображение пассивированной поверхности скола $n\text{-InP}/p\text{-InP}/p^+ - \text{InGaAsP}$, $U_t = 3.5$ В (положительное смещение на игле), $I_t = 1.0$ нА. Стрелками указаны границы разных слоев гетероструктуры.

высот с разной скоростью травления соседних слоев в ходе пассивации [2].

Проявившиеся $n - p$ переход и $p - p^+$ гетеропереход характеризуются разной величиной размытости границ 0.6 и 0.2 мкм соответственно. Легко показать, что наблюдаемые размытия заметно превышают приборный вклад в уширение, связанный с закругленностью конца иглы. При записи идеально резкой ступеньки высотой ΔZ приборное уширение ΔX связано с радиусом закругления иглы R соотношением $R = (\Delta X)^2 \times (2 \cdot \Delta Z)^{-1}$. При подстановке значений $\Delta X = 0.2$ и $\Delta Z = 0.06$ мкм для $p - p^+$ и $\Delta X = 0.6$ и $\Delta Z = 0.05$ мкм для $n - p$ переходов получаем оценки R : 0.3 и 3.6 мкм, заметно превышающие величины радиусов закругления, наблюдаемые в электронном микроскопе. Большая ширина $n - p$ перехода в СТМ изображении скорее всего является отражением его реальной размытости в гетероструктуре, которая проявилась в силу известной зависимости скорости травления поверхности от уровня легиро-

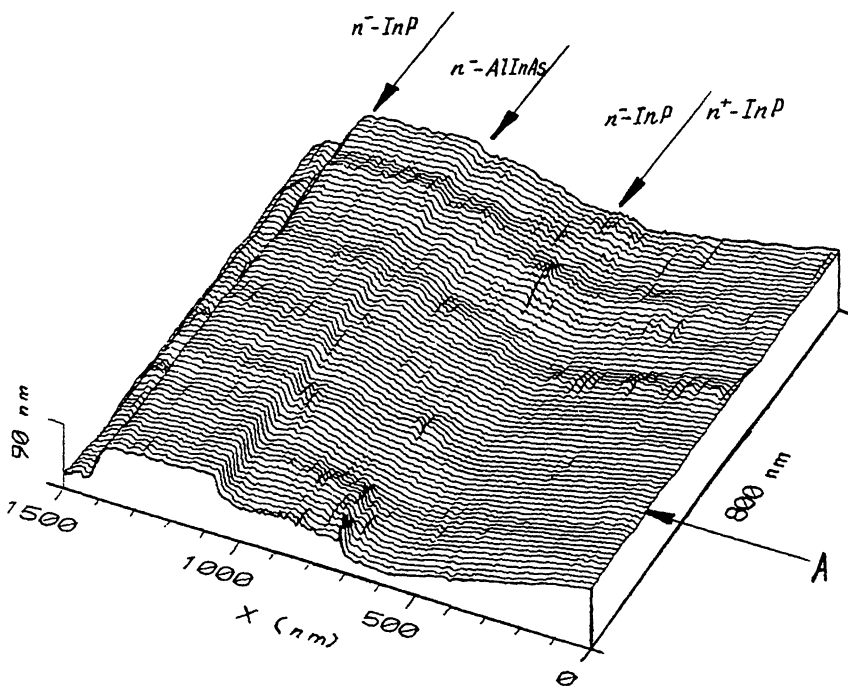


Рис. 2. СТМ изображение пассивированной поверхности скола $n^+-\text{InP}/n^--\text{InP}/n^--\text{AlInAs}/n^--\text{InP}$, $U_t = 3.5$ В, $I_t = 1.0$ нА. Стрелками указаны границы разных слоев гетероструктуры. Семейство ВАХ, приведенное на рис. 3, зарегистрировалось вдоль строки А.

вания мелкими примесями. Меньшая размытость $p-p^+$ гетероперехода ожидается из-за высокого уровня легирования слоя InGaAsP .

На рис. 2 приведено СТМ изображение участка скола образца $n^+-\text{InP}/n^--\text{InP}/n^--\text{AlInAs}/n^--\text{InP}$. Здесь также удастся выделить каждый слой исследуемой структуры. Переход n^+-n^- слабо проявляется в СТМ топографии. На рис. 2 он виден лишь как место изменения общего наклона поверхности. Более удачные условия для наблюдения переходов n^+-n^- реализуются при исследовании ВАХ. Семейство ВАХ, снятое вдоль строки А на рис. 2, приведено на рис. 3. Координаты по шкале X на рис. 2 и 3 совпадают. Для объяснения наблюдаемой картины отметим, что для пассивированных полупроводниковых поверхностей, которые обладают пониженной плотностью поверхностных состояний [1], ВАХ удовлетворительно описываются в рамках теории, развитой для планарных МДП структур [3]. При туннельном контакте с сильно легированным полупровод-

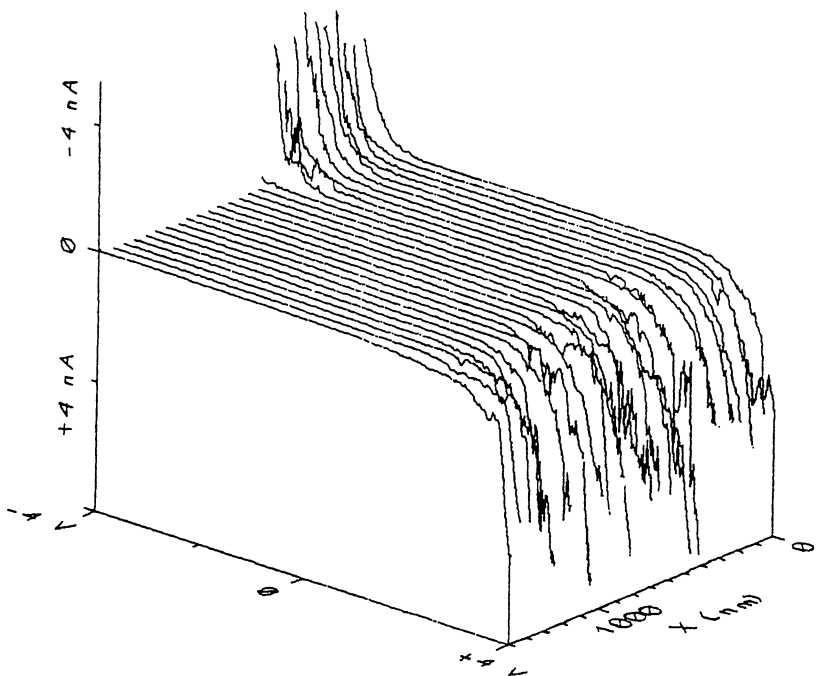


Рис. 3. Семейство ВАХ вблизи перехода $n^+ - n^-$. Петля поддержания постоянного тока отключалась при $U_t = 3.5$ В, $I_t = 1.0$ нА. Обратные ветви ВАХ направлены вверх.

ником ВАХ симметричны относительно “0” напряжения, а при контакте с нелегированным полупроводником наблюдаются классические диодные ВАХ. Резкое отличие обратных ветвей ВАХ в этих двух случаях должно способствовать выявлению $n^+ - n^-$ перехода, что и наблюдается на рис. 3.

Следует отметить большую резкость границ во втором образце, выращенном МOCVD методом. По данным ВАХ переход $n^+ - n^-$ имеет ширину не более 100 нм. Еще большую резкость имеют переходы InP/AlInAs и AlInAs/InP. Размытие их границ оценивается величиной 30 нм.

Таким образом, результаты работы показывают, что использование Na_2S пассивации открывает хорошие возможности для СТМ исследований гетероструктур на основе InP. Образующийся при пассивации рельеф СТМ изображения, получаемые ВАХ отражают как состав полупроводника, так и тип и уровень его легирования. Достигнутое на настоящее время разрешение границ раздела оценивается величиной 30 нм.

Авторы признательны докт.П.Вуазэ из Высшей Нормальной школы в Париже за предоставление для исследований структуры InP-AlInAs-InP.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93-02-3184).

Список литературы

- [1] *Yablonovitch E., Sandroff C.J., Bhat R., Gmitter T.* // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 6. P. 439.
- [2] *Dagata J.A., Tseng W., Bennet J., Schner J., Harary H.H.* // Ultramicroscopy. 1992. N 42-44. P. 1288.
- [3] *Kaiser W.J., Bell L.D., Hecht M.H., Grunhaner F.J.* // J. Vac. Sci. Techn. A. 1988. V. 6. N 2. P. 519.

Физико-технический
институт им.А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
9 ноября 1993 г.
