

# Микроскопия электростатических сил на сколах полупроводниковых лазерных диодов

© А.В. Анкудинов, Е.Ю. Котельников, А.А. Канцельсон, В.П. Евтихийев, А.Н. Титков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 22 декабря 2000 г. Принята к печати 27 декабря 2000 г.)

Рассмотрены возможности метода микроскопии электростатических сил для изучения приборных полупроводниковых структур. На примере исследования сколов лазерного диода в системе GaAlAs/GaAs показано, что применение метода позволяет находить положение и протяженность  $n-p$ -перехода в лазерной структуре, профиль падения напряжения поперек слоев структуры, а также распределение инжектированных носителей в волноводе.

## Введение

Миниатюризация полупроводниковых структур до субмикрометровых размеров делает необходимым прецизионный контроль распределений по их объему состава, легирования и электрических параметров. Развитие в последние годы различных методов атомно-силовой микроскопии (АСМ/AFM) [1] как нельзя лучше откликается на эти требования, обеспечивая пространственное разрешение до нескольких нанометров даже в условиях работы на воздухе. Данные о распределении параметров структур в их объеме получаются при исследовании сколов структур, пересекающих интересующие области.

Применение уже самых простых методов АСМ — топографического и определения силы трения зонда о поверхность — позволяет уверенно визуализировать все конструктивные элементы структур, отличающиеся химическим составом. На атомарно-гладких сколах после окисления на воздухе участки разного состава обычно различаются по высоте из-за разной толщины нарастающих окислов [2,3]. Наличие механических напряжений на границах разнородных материалов также может дать вклад в рельеф поверхности, визуализируя границы [4,5]. При применении метода определения силы трения участки поверхности разного состава выявляются по изменению на них измеряемой силы трения [5,6]. Развитие метода измерения локальной емкости между зондом и поверхностью [7] сделало возможным количественную характеристику двумерного профиля легирования в диапазоне концентраций от  $10^{15}$  до  $10^{20}$  см<sup>-3</sup> [8].

Разработан также АСМ-метод, позволяющий детектировать силу электростатического взаимодействия зонда с изучаемой поверхностью. В микроскопии электростатических сил (ЭСМ/EFM) измеряется механический отклик зонда под воздействием электростатической силы, зависящей от локальной разности потенциалов между зондом и поверхностью под ним, плотности поверхностных зарядов и локальной емкости [9,10]. Очевидно, что метод ЭСМ является весьма перспективным для анализа распределений собственных и внешних электрических полей в объеме приборных структур. При измерениях обычным методом ЭСМ распределения потенциа-

лов находятся в относительных единицах, что требует дополнительной калибровки. Однако уже существует и вариант метода ЭСМ (Кельвин-мода [10,11]), в котором измеряются абсолютные значения разности потенциалов.

В настоящей работе рассматривается применение метода ЭСМ для изучения распределений электрического поля поперек слоев полупроводниковых лазерных гетероструктур. В лазерных гетероструктурах внешнее напряжение падает преимущественно в области  $n-p$ -перехода, создаваемого путем различного легирования эмиттеров, располагающихся по разные стороны нелегированного волновода. Для успешной работы лазера положение  $n-p$ -перехода должно точно приходиться на область волновода. Традиционно положение  $n-p$ -перехода в лазерных гетероструктурах находилось методом измерения тока, индуцированного электронным зондом, сканирующим область обратно смещенного  $n-p$ -перехода (в западной литературе этот метод носит название EBIC — electron beam induced current) [12,13]. В EBIC-методе регистрируемый ток максимален при попадании электронного луча примерно в середину обратно смещенного  $n-p$ -перехода. Истинное положение  $n-p$ -перехода находится из сопоставления измеренного распределения наведенного тока с модельными зависимостями. Точность сопоставления зависит от довольно большого числа параметров, таких как диффузионная длина носителей, скорость поверхностной рекомбинации, ширина обедненной области, форма функции генерации носителей. Поэтому в EBIC-методе трудно добиться нанометровой точности определения положения  $n-p$ -перехода, необходимой для современных лазерных гетероструктур, содержащих квантово-размерные слои.

В методе ЭСМ заложена возможность непосредственного определения распределения электрического поля на изучаемой поверхности (в нашем случае — на поперечном сколе лазерной структуры). Одновременно дается и прямая привязка получаемых профилей напряжения к деталям структуры лазера, которые выявляются в топографических АСМ-изображениях, получаемых одновременно с данными ЭСМ. Метод может реально обеспечивать нанометровое планарное разрешение на

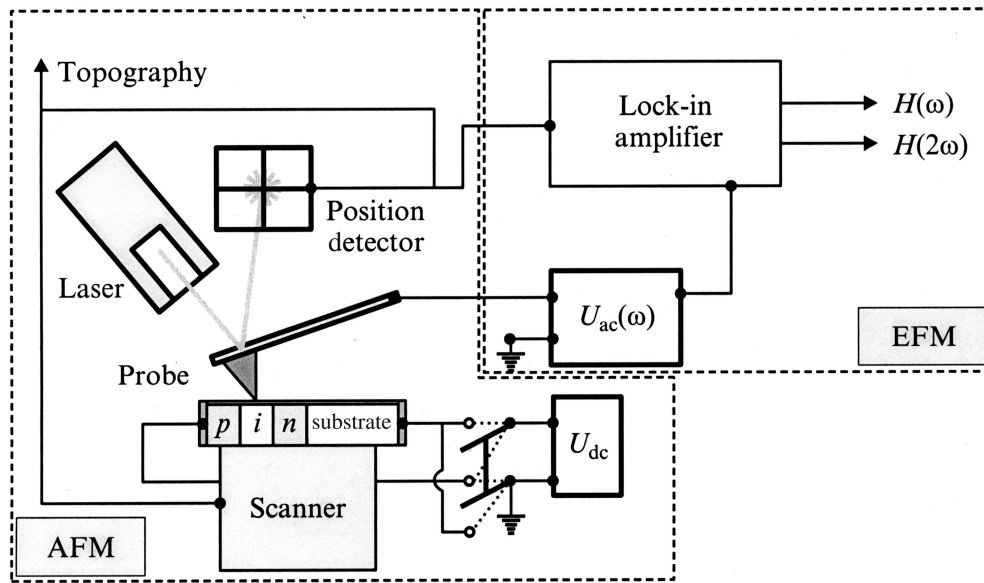


Рис. 1. Экспериментальная установка.

уровне 20–30 нм, которое определяется диаметром кончика зонда. Как будет показано далее, ЭСМ-измерения чувствительны также к локальным изменениям емкости поверхности, откуда может быть получена дополнительная информация об электронных свойствах структур.

Нами было предпринято исследование возможностей метода ЭСМ при изучении лазерной гетероструктуры на основе хорошо освоенной системы GaAlAs/GaAs/GaAlAs. Надо отметить, что ЭСМ-исследования лазерных гетероструктур только начинаются. В недавно появившихся первых работах для лазерных гетероструктур GaAlSb/GaSb/GaAlSb [14] и InP/InGaAsP/InP [14,15] используется бесконтактная ЭСМ-мода, когда зонд не касается поверхности, а совершает резонансные колебания на некотором удалении от нее. Мы применили недавно появившийся метод контактной ЭСМ-моды [16], в котором зонд все время находится в постоянном контакте с изучаемой поверхностью. В этом случае зонд максимально близок к изучаемой поверхности, что обеспечивает одновременно повышение чувствительности и планарного разрешения метода ЭСМ. Важным является и существенное удешевление эксперимента, так как в режиме контактной моды используются значительно более долговечные и более дешевые зонды.

## Методика

Рассмотрим кратко основные идеи метода ЭСМ [9–11]. Если зонд находится под потенциалом  $U$  относительно изолированной от него изучаемой поверхности, то

между ними возникает сила электростатического взаимодействия

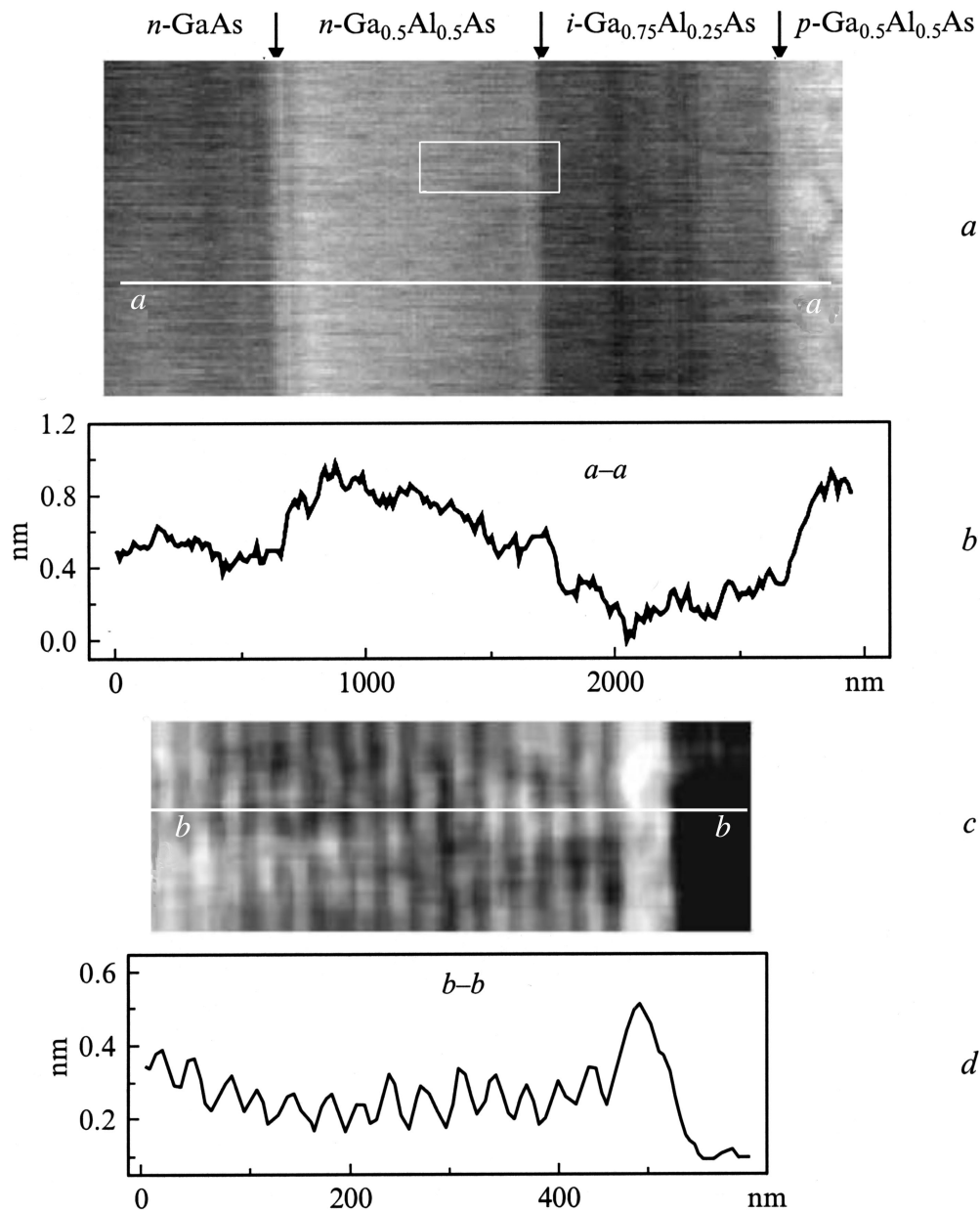
$$F_{el} = (1/2)[d(CU^2)/dz], \quad (1)$$

где  $C$  — емкость между зондом и образцом, а ось  $z$  — направлена перпендикулярно поверхности образца. Обычно между зондом и поверхностью существует начальная разность потенциалов  $V_{cp}$ , обусловленная разными работами выхода для разных материалов. В эксперименте между ними могут быть дополнительно приложены постоянное  $U_{dc}$  и переменное  $U_{ac} \cos(\omega t)$  напряжения. Подстановка в (1) суммарного напряжения  $V_{cp} + U_{dc} + U_{ac} \cos(\omega t)$  показывает, что результирующая сила  $F_{el}$  будет иметь три компоненты: одну постоянную во времени и еще две переменные, осциллирующие с частотами  $\omega$  и  $2\omega$  соответственно. Осциллирующие компоненты имеют вид

$$F_{el}(\omega) = (dC/dz)(V_{cp} + U_{dc})U_{ac} \cos(\omega t), \quad (2)$$

$$F_{el}(2\omega) = (1/4)(dC/dz)U_{ac}^2 \cos(2\omega t). \quad (3)$$

Переменная сила вызовет колебания зонда на частотах  $\omega$  и  $2\omega$ , которые могут быть протектированы. Амплитуды вынужденных колебаний обычно малы (порядка нанометра) и линейно связаны с гармониками силы  $F_{el}(\omega)$  и  $F_{el}(2\omega)$  [16]. Таким образом, регистрируя амплитуды колебаний зонда на частотах  $\omega$  и  $2\omega$ , можно измерять сигналы  $H(\omega)$  и  $H(2\omega)$ , пропорциональные изменению компонент электростатической силы  $F_{el}(\omega)$  и  $F_{el}(2\omega)$ . При этом сигнал  $H(2\omega)$  будет отражать изменение емкости в разных точках поверхности, а сигнал  $H(\omega)$  еще и изменение разности потенциалов между поверхностью и зондом.



**Рис. 2.** Топография поверхности скола  $1.5 \times 3.0 \mu\text{м}^2$  лазерной гетероструктуры  $n\text{-GaAs}/n\text{-Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}/i\text{-Ga}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}/p\text{-Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ , полученная методом АСМ в контактном режиме при силе взаимодействия зонда с поверхностью  $F = 50 \text{ нН}$ : *a* — топографическое изображение поверхности скола; *b* — профиль поверхности вдоль линии *a–a* на изображении *a*; *c* — топографическое изображение участка поверхности скола эмиттера  $n\text{-Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ , выделенного на *a* прямоугольником; *d* — профиль поверхности вдоль линии *b–b* на изображении *c*.

Исследования проводились с использованием атомно-силового микроскопа Р-4 SPM (NT-MDT, Россия). Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. Зонд АСМ представляет собой остро заточенную пирамиду высотой  $\sim 10 \mu\text{м}$ , закрепленную основанием на одном краю прямоугольной микроконсоли (cantilever) длиной  $\sim 200 \mu\text{м}$  и сечением  $\sim 20 \times 2 \mu\text{м}^2$ , второй конец которой крепится на опоре лазерного устройства, отслеживающего колебания края консоли с пирамидой. Нами использовались зонды для контактного режима

CSC12/15 (Silicon-MDT, Россия), изготовленные из сильно легированного кремния *p*-типа проводимости. Для проведения исследований сканер с закрепленной полупроводниковой лазерной гетероструктурой вытягивается и прижимает изучаемую поверхность скола структуры к острой вершине пирамиды. Переменное напряжение между зондом и поверхностью (в диапазоне частот 200–400 кГц) подавалось от генератора, встроенного в блок резонансной моды микроскопа, постоянное напряжение прикладывалось поперек лазерной гетеро-

структуры. Генератор переменного напряжения может иметь общее заземление с  $p$ - или  $n$ -контактом лазера. Электрическая изоляция зонда от поверхности скола обеспечивалась слоями окислов, покрывающих кремниевую пирамиду и поверхность скола. Силу механического прижима  $F$  можно было регулировать и сделать значительно больше электростатической силы  $F_{el}$ , чтобы изменения  $F_{el}$  не влияли на сигнал, отслеживающий и топографию, измеряемый при поддержании полной силы постоянной. Режим работы микроскопа позволял одновременно регистрировать сигнал топографии и один из ЭСМ-сигналов,  $H(\omega)$  или  $H(2\omega)$ , которые измерялись синхронным детектором блока резонансной моды.

В работе исследовалась лазерная гетероструктура  $n\text{-GaAs}/n\text{-Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}/i\text{-Ga}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}/p\text{-Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ , выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Подложка и  $n$ -эмиттер были легированы Si до уровня  $(1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Волновод специально не легировался, а  $p$ -эмиттер был легирован Be до уровня  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

## Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2, *a* представлено топографическое АСМ-изображение скола исследовавшейся лазерной гетероструктуры. Темная полоса в левой части изображения соответствует подложке  $n\text{-GaAs}$ . При движении в правую сторону изображения ее сменяет более светлая полоса, отвечающая области  $n\text{-Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ . Увеличение яркости означает повышение рельефа данной части поверхности. Далее следуют еще одна темная полоса (область  $i\text{-Ga}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$ ) и за ней опять более светлая полоса (область  $p\text{-Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ ). Перепад высот различных областей лазера на сколе доходил до 0.6 нм, как можно видеть из приведенного на рис. 2, *b* профиля, полученного вдоль линии  $a-a$  на рис. 2, *a*. Различие на сколе высот областей с разным содержанием Al является известным фактом [2,3] и объясняется большей толщиной естественного окисла на участке поверхности с повышенным содержанием Al. Данное обстоятельство, в частности, позволило разрешить и тонкую структуру слоя  $n$ -эмиттера, который был сформирован в виде сверхрешетки  $n\text{-Ga}_{0.48}\text{Al}_{0.52}\text{As}$  (30 нм)/ $n\text{-GaAs}$  (1.5 нм) и завершался слоем  $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$  толщиной 50 нм. На рис. 2, *c* с большим увеличением показан участок  $n$ -эмиттера (выделен на рис. 2, *a* белой рамкой). На рис. 2, *c*, а также на профиле на рис. 2, *d* легко разрешаются решетка светлых и темных полос с периодом 32 нм и одна более широкая светлая полоса на правом крае.

Рассмотрим теперь поведение сигнала  $H(2\omega)$  при сканировании зондом слоев структуры, а также при переключении полярности напряжения  $U_{dc}$ , приложенного к контактам лазера, представленное на рис. 3, *b*. Верхняя половина кадра снималась при обратном смещении  $n-p$ -перехода (закрытый  $n-p$ -переход), а нижняя при

прямом смещении (открытый  $n-p$ -переход). Наблюдается изменение контраста изображения сигнала  $H(2\omega)$  на сколе, свидетельствующее об отличии емкости зонд-поверхность на разных слоях, а также о заметном увеличении емкости на волноводе при открытии  $n-p$ -перехода. Для привязки сигнала  $H(2\omega)$  к элементам лазерной гетероструктуры на рис. 3, *a* также приведено топографическое АСМ-изображение верхней части изучаемого участка скола.

Для анализа данных на рис. 3 требуется рассмотреть природу емкости ( $C$ ) системы зонд-(полупроводниковый образец). В первом приближении можно выделить два главных вклада: емкость зонд-(поверхность полупроводника) ( $C_1$ ) и последовательно соединенная емкость обедненного слоя полупроводника ( $C_2$ ). Тогда

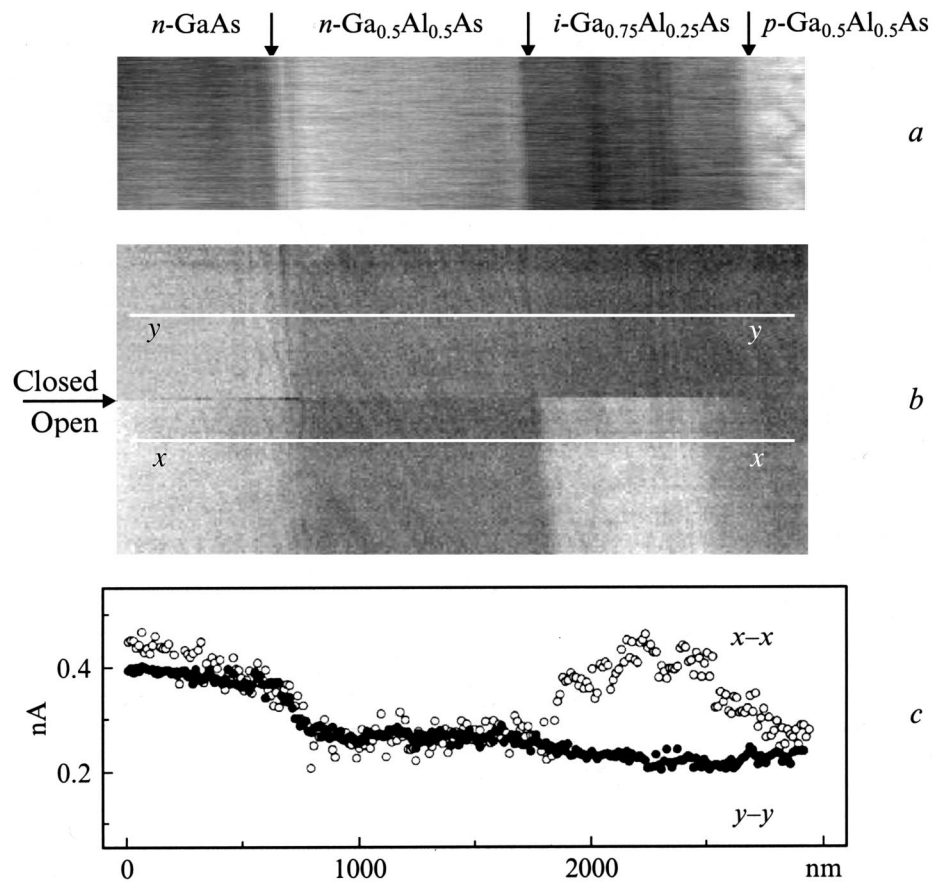
$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2). \quad (4)$$

Здесь  $C_1 = \varepsilon_i \varepsilon_0 S / D$ ,  $C_2(U) = \varepsilon_s \varepsilon_0 S / W(U)$ , где  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_s$  и  $\varepsilon_0$  — диэлектрические проницаемости поверхностного окисла, полупроводника и вакуума соответственно,  $S$  — площадь контакта,  $D$  — толщина окисла,  $W(U)$  — толщина области приповерхностного обеднения в полупроводнике, зависящая от приложенного напряжения. Уже в таком упрощенном приближении данные рис. 3 находят понятное качественное объяснение.

Рассмотрим изменение емкости на слоях закрытого  $n-p$ -перехода лазера. Уменьшение емкости на слое  $n\text{-GaAlAs}$  относительно емкости на столь же сильно легированной подложке  $n\text{-GaAs}$  естественно связать с уже обсуждавшимся увеличением толщины окисла для слоев, содержащих Al. Оценим величину эффекта. Толщина естественного окисла на GaAs составляет 1.5 нм [3], а для  $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$  толщину естественного окисла можно оценить величиной 4 нм, учитывая, что при содержании Al 30% толщина окисла составляет 2.5 нм [3]. Толщина естественного окисла на кремнии, материале зонда, — меньше 4 нм [17]. Учитывая, что анализируемый сигнал  $H(2\omega)$  пропорционален первой производной  $dC/dz$ , при преобладании емкости  $C_1$  его уменьшение, пропорциональное квадрату толщины окисла, должно было бы составлять 3–4 раза. Наблюдаемое уменьшение не превышает 2 раз. Поэтому можно думать о заметной роли емкости  $C_2$ .

Действительно (см. профиль  $y-y$  на рис. 3, *c*), при закрытом  $n-p$ -переходе емкость на волноводном слое оказывается даже несколько меньше емкости на эмиттерах, которые содержат в 2 раза больше Al. Этот факт можно связать с уширением области приповерхностного обеднения в нелегированном слое. Явную роль емкость  $C_2$  играет в резком увеличении сигнала на  $i$ -слое при открытии  $n-p$ -перехода и инжекции большого числа носителей в область  $i\text{-GaAlAs}$ . В этом случае область приповерхностного обеднения сужается и емкость на  $i$ -слое возрастает.

На рис. 3, *b* обращает на себя внимание заметно меньшая ширина области сильного возрастания емкости



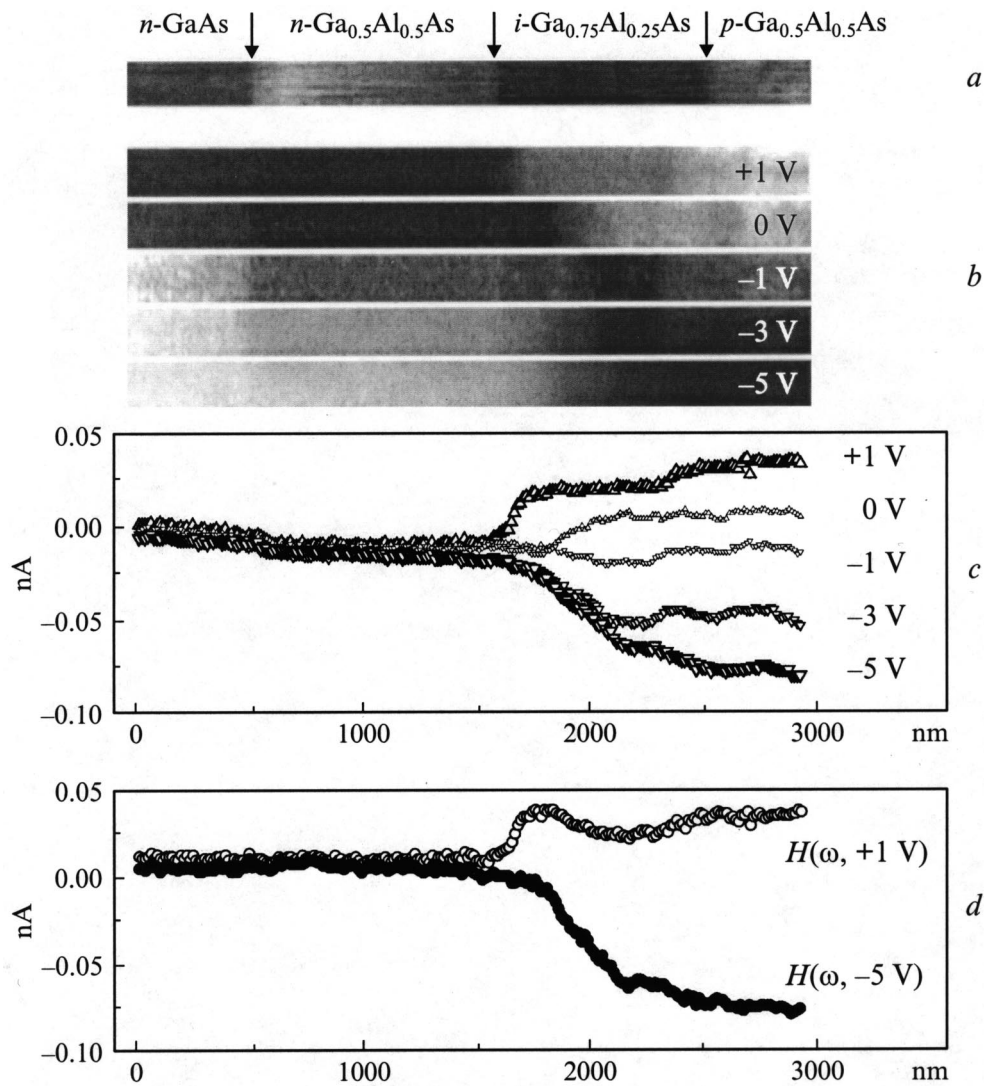
**Рис. 3.** Поведение ЭСМ-сигнала  $H(2\omega) \propto dC/dz$  на поверхности скола  $1.5 \times 3.0 \text{ мкм}^2$  лазерной гетероструктуры: *a* — топографическое АСМ-изображение верхней части ( $0.75 \times 3.0 \text{ мкм}^2$ ) изучаемого участка скола; *b* — тоновое изображение изменения сигнала  $H(2\omega)$ ,  $U_{ac} = 3 \text{ В}$ , стрелка показывает момент перехода  $n$ - $p$ -перехода от закрытого состояния к открытому при переключении полярности постоянного смещения  $U_{dc}$  на  $p$ -контакте лазера с  $-5$  на  $+1.2 \text{ В}$  и заземленном  $n$ -контакте; *c* — профили  $x$ - $x$  и  $y$ - $y$  сигнала  $H(2\omega)$  соответственно при закрытом  $n$ - $p$ -переходе (по линии  $x$ - $x$  на изображении *b*) и открытом  $n$ - $p$ -переходе (по линии  $y$ - $y$  на изображении *b*).

при открытии  $n$ - $p$ -перехода по сравнению с шириной волновода, наблюдаемой на топографическом изображении скола на рис. 3, *a*. Об этом же говорит и вид профиля  $x$ - $x$  сигнала  $H(2\omega)$  на рис. 3, *c*. Увеличение емкости происходит резко на левой границе волновода и гораздо медленней нарастает со стороны правой границы. На наш взгляд, наблюдаемая затыжка свидетельствует о снижении концентрации инжектируемых носителей в волноводе со стороны  $p$ -эмиттера.

Перейдем к анализу ЭСМ-изображений лазерной гетероструктуры, полученных в режиме измерения сигнала  $H(\omega)$ . На рис. 4, *b* приведена серия изображений, полученных для разных напряжений смещений лазерной гетероструктуры при заземленном  $n$ -контакте: от  $+1 \text{ В}$  на  $p$ -контакте (почти открытый  $n$ - $p$ -переход) до  $-5 \text{ В}$  (закрытый  $p$ - $n$ -переход). В левой части всех изображений наблюдается ступень, позволяющая осуществить независимую привязку к положению слоев в лазере (см. также топографическое АСМ-изображение на рис. 4, *a*) и вызванная уменьшением емкости при переходе с подложки  $n$ -GaAs на  $n$ -эмиттер. Светлые области в

изображениях  $H(\omega)$  соответствуют большим значениям сигнала и показывают увеличение поверхностного потенциала. Так, при нулевом смещении  $n$ -сторона лазера выглядит темной, что указывает на ожидаемое уменьшение контактной разности потенциалов образец-зонд при переходе с  $p$ - на  $n$ -область.

Изменение сигнала  $H(\omega)$  можно лучше рассмотреть на рис. 4, *c*, где приведены его профили. Профили не корректировались на изменение емкости и поэтому отражают суммарные зависимости  $H(\omega)$  от  $(dC/dz)(V_{cp} + U_{dc})$ . Имеющие место изменения емкости (см. рис. 3), однако, не мешают рассмотреть картину распределения напряжений в структуре. Так, в отсутствие смещения емкость в области волновода практически не менялась и к тому же мало отличалась от значений емкости  $n$ - и  $p$ -эмиттеров. Поэтому зарегистрированное возрастание потенциала в области волновода при нулевом смещении должно достоверно отражать положение и протяженность  $p$ - $n$ -перехода. Далее, мы наблюдали, что приложение запирающего напряжения не оказывает заметного влияния на поверхностную емкость всех слоев структур.



**Рис. 4.** Поведение ЭСМ-сигнала  $H(\omega) \propto (V_{cp} + U_{dc})dC/dz$  на поверхности скола  $0.2 \times 3.0 \text{ мкм}^2$  лазерной гетероструктуры;  $U_{ac} = 3 \text{ В}$ ; постоянное смещение  $U_{dc}$  прикладывалось к  $p$ -контакту лазера,  $n$ -контакт заземлен, фаза синхронного детектора настраивалась на максимальный положительный уровень сигнала в  $p$ -области лазера при прямом смещении. *a* — топографическое АСМ-изображение изучаемого участка скола; *b* — тоновые изображения изменения сигнала  $H(\omega)$  при различных напряжениях  $U_{dc}$  на лазерной структуре; *c* — профили сигнала  $H(\omega)$ , взятые на соответствующих тоновых изображениях *b*; *d* — ход сигналов  $H(\omega, +1 \text{ В})$  и  $H(\omega, -5 \text{ В})$  за вычетом фоновых сигналов  $H(\omega, 0 \text{ В})$ , определяющих профиль приложенного напряжения  $U_{dc}$  на лазерной гетероструктуре в открытом и закрытом состояниях  $n$ - $p$ -перехода соответственно.

Поэтому изменение в этом случае характера поведения потенциала в области волновода (уменьшение вместо имевшего место нарастания) объективно отражает процесс запираания  $n$ - $p$ -перехода ( $U_{dc} = 0 - (-5 \text{ В})$ ). Некоторое влияние изменения емкости на волноводе можно предполагать только в случае открывания  $n$ - $p$ -перехода ( $U_{dc} = +1 \text{ В}$ ), когда емкость заметно растет. Однако емкость меняется лишь в 1.5–2 раза относительно уровня  $H(2\omega)$  на подложке  $n$ -GaAs (см. соотношение величин емкостей на рис. 3, *c*), реальный же рост сигнала  $H(\omega)$  при открывании  $n$ - $p$ -перехода заметно больше.

Таким образом, получена объективная картина распределения напряжений на лазерной гетероструктуре. При всех смещениях падение напряжения в области

$n$ -подложки, а также  $n$ - и  $p$ -эмиттера не наблюдалось. Заметное падение напряжения, как можно видеть по месту ветвления профилей сигнала  $H(\omega)$  на рис. 4, *c*, начинается на границе  $n$ -эмиттер–волновод. Распределения внешнего напряжения  $U_{dc}$  для открытого и закрытого  $n$ - $p$ -перехода лазера показаны на рис. 4, *d*, где приведены профили сигналов  $H(\omega, +1 \text{ В})$  и  $H(\omega, -5 \text{ В})$  за вычетом сигнала  $H(\omega, 0 \text{ В})$ , полученного при нулевом смещении. Видно, что при закрытом  $n$ - $p$ -переходе потенциал в волноводе спадает нелинейно, а при открытом  $n$ - $p$ -переходе увеличение потенциала имеет ступенчатый характер. Обращает на себя внимание, что в изучавшейся лазерной структуре падение напряжения во всех случаях происходит в основном на первых двух третях волновода.

В заключение отметим, что проведенные исследования показали большие возможности применения контактного ЭСМ-метода в диагностике полупроводниковых приборных структур. Для исследовавшейся в работе лазерной гетероструктуры применение ЭСМ-метода позволило выявить на ее сколах все характерные слои структуры, определить положение и протяженность  $n-p$ -перехода, получить профили падения напряжения на лазере в открытом и закрытом состояниях, а также, используя емкостные измерения, охарактеризовать распределение инжектированных носителей в волноводе.

Авторы выражают благодарность М.С. Дунаевскому за помощь в проведении эксперимента и Н.М. Шмидт за полезные обсуждения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 00-02-16948) и Министерством науки (грант 97-1035).

## Список литературы

- [1] G. Binnig, Ch. Gerber, E. Stell, T.R. Albert, C.F. Quake. *Europhys. Lett.*, **3**, 1281 (1987).
- [2] P. Moriarty, G. Hughes. *Ultramicroscopy*, **42-44**, 956 (1992).
- [3] A.V. Ankudinov, V.P. Evtikhiev, V.E. Tokranov, V.P. Ulin, A.N. Titkov. *Semiconductors*, **33**, 555 (1999).
- [4] I. Suemune, M. Hoshiyama. *Japan. J. Appl. Phys.*, **33**, pt 1, 3748 (1994).
- [5] A.V. Ankudinov, A.N. Titkov, T.V. Shubina, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, H.-J. Lugauer, G. Reuscher, M. Keim, A. Waag, G. Landwehr. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2626 (1999).
- [6] G. Bratina, L. Vanzetti, A. Franciosi. *Phys. Rev. B*, **52**, R8625 (1995).
- [7] C.C. Williams, J. Slinkman, W.P. Hough, H.K. Wickramasinghe. *Appl. Phys. Lett.*, **55** 1662 (1989).
- [8] V.V. Zavyalov, J.S. McMurray, C.C. Williams. *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 158 (1999).
- [9] Y. Martin, D.W. Abraham, H.K. Wickramasinghe. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 1103 (1988).
- [10] D. Sarid. *Scanning Force Microscopy* (N.Y., Oxford University Press, 1992).
- [11] B.D. Terris, J.E. Stern, D. Rugar, H.J. Mamin. *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 2669 (1989).
- [12] H.J. Leamy. *J. Appl. Phys.*, **53**, R51 (1982).
- [13] С.Г. Конников, В.А. Соловьев, В.Е. Уманский, А.А. Хусаинов, В.М. Чистяков, И.Н. Ясневич. *ФТП*, **21**, 1648 (1987).
- [14] G. Leveque, P. Girard, E. Skouri, D. Yareka. *Appl. Surf. Sci.*, **157**, 251 (2000).
- [15] F. Robin, H. Jacobs, O. Homan, A. Stemmer, W. Bachtold. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2907 (2000).
- [16] J.W. Hong, K.H. Noh, Sang-il Park, S.I. Kwun, Z.G. Khim. *Phys. Rev. B*, **58**, 5078 (1998).
- [17] G.D. Wilk, Yi. Wei, Hal Edwards, R.M. Wallace. *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 2288 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

## Cross-sectional electrostatic force microscopy of semiconductor laser diodes

A.V. Ankudinov, A.N. Titkov, E.U. Kotelnikov,  
A.A. Kanzelson, V.P. Evtikhiev

Ioffe Physicotechnical Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Possibilities of the electrostatic force microscopy (EFM) for studying semiconductor devices have been considered. EFM investigation of cleavages of laser diodes in a classical GaAlAs/GaAs system has shown that the application of the EFM method makes it possible to determine both the position and extension of the  $n-p$  junction in laser structure, as well as the potential profile along the structure axis and the volume distribution of the injected carriers throughout the waveguide.