

06:07:12

Новые возможности растровой электронной микроскопии для исследования лазеров на основе InAsSb/InAsSbP

© В.А. Соловьев, М.П. Михайлова, М.В. Степанов,
В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 17 декабря 1996 г.

В работе продемонстрированы новые возможности использования методов растровой электронной микроскопии для идентификации гетерограниц, контроля резкости интерфейсов, а также определения положения $p-n$ перехода в лазерных структурах на основе InAsSb/InAsSbP, в том числе при низких температурах. Предложенная методика позволила оптимизировать параметры длинноволновых лазеров и достигнуть рекордно низких пороговых токов ($I_{th} \leq 25$ мА при $T = 77$ К) при длинах волн генерации $\lambda = 3-3.5$ мкм.

В последние годы большое внимание уделяется диодным лазерам среднего ИК диапазона 3–5 мкм на основе узкозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 [1–5]. Такие лазеры, работающие при комнатной температуре, весьма важны для задач лазерной диодной спектроскопии и экологического мониторинга, поскольку в указанном спектральном диапазоне лежат полосы поглощения многих промышленных и природных газов [6]. Однако к настоящему времени максимальная рабочая температура, достигнутая в лазерах на основе твердых растворов InAsSb/InAsSbP составляет 180–200 К [1,4].

Задача получения более совершенных лазерных структур, имеющих соответственно более высокую рабочую температуру, напрямую связана с развитием методов контроля параметров внутренней геометрии структуры, таких как толщины слоев, резкость гетерограниц, положение $p-n$ перехода относительно гетерограницы и т. д. Последний параметр особенно важен, так как от него зависит в значительной степени величина порогового тока инжекционных гетеролазеров. Широкое применение для диагностики гетероструктур получили методы растровой

электронной микроскопии, обладающие высоким пространственным разрешением и возможностью регистрации различных сигналов, в том числе: методы вторичных электронов, отраженных электронов, тока, индуцированного электронным зондом, и др. [7]. Для определения положения $p-n$ перехода относительно определенных гетерограниц может быть использована одновременная регистрация сигналов тока, индуцированного электронным зондом, и отраженных электронов либо тока, индуцированного электронным зондом, и вторичных электронов. Однако попытка использования традиционных подходов растровой электронной микроскопии для исследования лазеров на основе твердых растворов InAsSb и InAsSbP наталкивается на ряд проблем, решению которых и посвящена данная работа.

В частности, такие гетероструктуры имеют, как правило, значительные токи утечки при температуре 300 К, что не позволяет в большинстве случаев регистрировать сигнал тока, индуцированного электронным зондом, в них при комнатной температуре. Трудности возникают и при регистрации сигнала отраженных электронов из-за малого значения сигнал-шум. Кроме того, профили сигнала отраженных электронов имеют необычный вид, трудно объяснимый из сопоставления с ранее известными из литературы.

Были исследованы двойные гетероструктуры с широкозонными эмиттерами InAsSb_{0.15}P_{0.3} и активной областью InAsSb_{0.05}, а также структуры с расширенным волноводом InAsSb_{0.05}P_{0.1}, выращенные методом жидкофазной эпитаксии на подложках InAs(100). Линейные профили сигналов вторичных электронов, отраженных электронов и тока, индуцированного электронным зондом, измерялись путем сканирования электронного зонда по плоскости скола исследуемого образца в направлении, перпендикулярном эпитаксиальным слоям. Ускоряющее напряжение в наших экспериментах выбиралось $U = 10-15$ кВ, ток зонда $I_b = (1-5) \cdot 10^{-10}$ А.

С целью решения задачи идентификации и точного определения положения гетерограниц в структурах на основе узкозонных полупроводников были проведены исследования особенностей формирования сигналов вторичных электронов и отраженных электронов, тем более что именно эти сигналы используются также для измерения толщин слоев с разным химическим составом.

Было установлено, что контраст в режиме вторичных электронов не является стабильным. При однократном сканировании предварительно

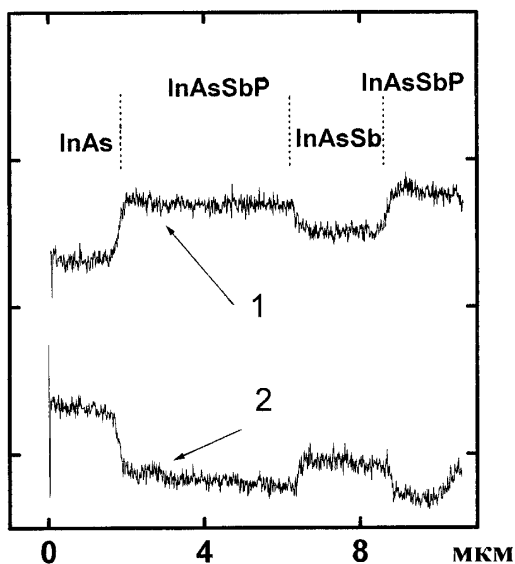


Рис. 1. Линейные профили сигналов отраженных электронов (1) и вторичных электронов (2) для двойной гетероструктуры.

необлученного участка наблюдается достаточно сильный контраст, противоположный по знаку контрасту в режиме отраженных электронов (рис. 1). При многократном сканировании он уменьшается, изменяется по знаку и становится похожим на контраст в режиме отраженных электронов. Таким образом, более предпочтительным оказывается использование режима отраженных электронов.

Особенностью исследуемых структур на основе многокомпонентных твердых растворов является то, что средние атомные номера (Z) для соседних эпитаксиальных слоев отличаются незначительно. Поэтому величина контраста отраженных электронов достаточно мала даже по сравнению с системой AlGaAs–GaAs [8] и составляет $< 2\%$ относительных. Для исключения артефактов и точного определения положения гетерограниц профили отраженных электронов изучались на свежесколотых структурах до нанесения на них контактов, причем выбирались близкие к кристаллографическим сколы с минимальным количеством дефектов.

В работе [9] на примере структур AlGaAs–GaAs было показано, что сигнал отраженных электронов изменяется немонотонно вблизи гетероперехода. Линейные профили отраженных электронов имеют максимум и минимум интенсивности по разные стороны от границы раздела, что обусловлено эффектом анизотропии энергетического спектра отраженных электронов на гетеропереходе [9]. Что касается структур, исследованных в данной работе, то аналогичные профили отраженных электронов наблюдались только для гетеропереходов между слоями InAsSbP с разным содержанием фосфора.

Как видно из рис. 1, величина выхода отраженных электронов для слоев InAsSbP больше, чем для соединений InAs или InAsSb. Однако профиль сигнала отраженных электронов, получаемый на резких гетеропереходах InAsSbP–InAs или InAsSbP–InAsSb, значительно отличается от профилей отраженных электронов для системы AlGaAs–GaAs и имеет вид зигзагообразной кривой (рис. 2, *a*). Мы полагаем, что плавные изменения сигнала отраженных электронов по мере движения электронного зонда к границе раздела обусловлены различием в тормозной способности материалов, составляющих гетеропару [9], в то время как скачок сигнала отраженных электронов на гетеропереходе связан с особенностями прямого рассеяния электронов в четверных твердых растворах InAsSbP по сравнению с бинарными и тройными соединениями. Следует отметить, что зигзагообразный вид профиля отраженных электронов со скачком на гетеропереходе характерен для резких границ раздела. Чем менее резкий гетеропереход, тем меньше и положе наблюдаемый в сигнале отраженных электронов скачок. Для плавных (диффузионных) гетеропереходов он вообще отсутствует (рис. 2, *b*).

Для реализации метода определения положения p – n перехода в структурах на основе узкозонных полупроводников нами предлагается проводить измерения при низких температурах, например близких к температуре жидкого азота. С понижением температуры в таких структурах величина токов утечки значительно уменьшается, что дает возможность зарегистрировать сигнал тока, индуцированного электронным зондом.

Для регистрации сигнала тока, индуцированного электронным зондом, использовался прецизионный малошумящий усилитель, позволяющий измерять сигнал тока, индуцированного электронным зондом, при токах электронного зонда $I_b < 10^{-12}$ А. Эксперименты проводились

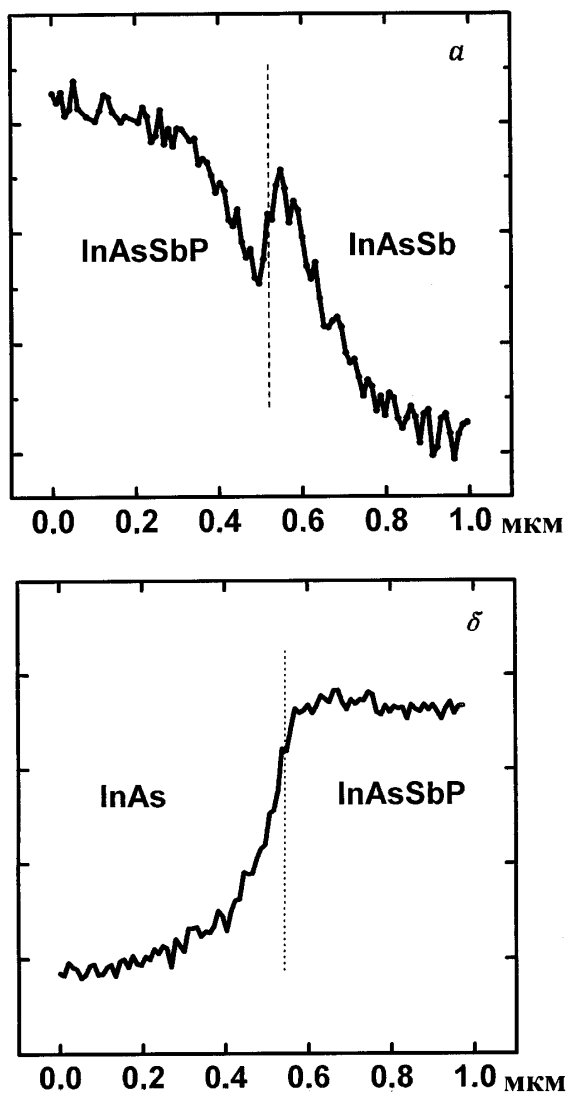


Рис. 2. Линейные профили сигналов отраженных электронов вблизи гетеропереходов InAsSbP–InAsSb (*a*) и InAs–InAsSbP (*b*).

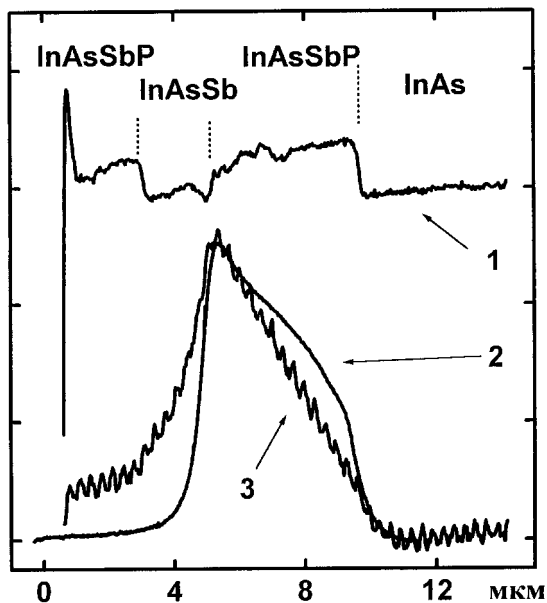


Рис. 3. Линейные профили сигналов отраженных электронов (1) и тока, индуцированного электронным зондом, при температурах $T = 81$ К (2) и 300 К (3) для двойной гетероструктуры.

в температурном интервале $T = 81-300$ К на автоматизированной установке, созданной на базе растрового электронного микроскопа CamScan Series 4-88 DV100 с системой охлаждения столика для объектов до $T = 77$ К. Исследуемые лазеры закреплялись на специально разработанной приставке, которая затем устанавливалась на штатный столик.

Даже в тех редких случаях, когда удастся зарегистрировать сигнал тока, индуцированного электронным зондом, при температуре $T = 300$ К, охлаждение исследуемого образца позволяет существенно повысить отношение сигнал-шум, а следовательно, и точность определения положения $p-n$ перехода (рис. 3). Разумеется, применяя методы обработки кривой тока, индуцированного электронным зондом, можно получить информацию о диффузионных длинах, скоростях поверх-

ностной и интерфейсной рекомбинации неосновных носителей заряда. При этом положительным моментом является то, что перечисленные параметры могут быть определены при тех температурах, при которых работает лазер.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрированы новые возможности идентификации гетерограниц, контроля резкости интерфейсов, а также определения положения $p-n$ перехода в лазерах на основе InAsSb/InAsSbP с использованием методов растровой электронной микроскопии. Предложенная методика позволила оптимизировать параметры длинноволновых лазерных структур на основе InAsSb/InAsSbP и получить рекордно низкие пороговые токи ($I_{th} \leq 25$ мА при $T = 77$ К) в диапазоне длин волн генерации $\lambda = 3-3.5$ мкм [5].

Работа выполнена при частичной поддержке Европейского отделения аэрокосмических исследований и разработок США (EOARD), контракт № F61708-96-W0078.

Список литературы

- [1] Baranov A.N., Imenkov A.N., Sherstnev V.V., Yakovlev Yu.P. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N 19. P. 2482-2490.
- [2] Choi H.K., Eaglash S.Y., Turner G.W. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 812-814.
- [3] Zhang Y.H. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 118-120.
- [4] Данилова Т.Н., Еришов О.Г., Именков А.Н., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 7. С. 667-670.
- [5] Popov A., Sherstnev V., Yakovlev Yu., Muecke R., Werle P. // Spectrochimica Acta. Part A. 1996. V. 52. P. 863-870.
- [6] Nadezhdinski A.I., Prokhorov A.M. // SPIE. 1992. V. 1724. P. 2-62.
- [7] Дж. Гулдстейн, Ньюберри Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. Кн. 1. М.: Мир. 1984. 303 с.
- [8] Соловьев В.А., Соловьев С.А., Уманский В.Е. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1990. Т. 54. № 2. С. 232-236.
- [9] Бакалейников Л.А., Конников С.Г., Соловьев В.А., Уманский В.Е. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1987. Т. 51. № 3. С. 458-461.