

06.2;07

Одновременная интерфейсная и межзонная лазерная генерация в гетероструктуре InAs/InAsSbP, выращенной методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений

© А.П. Астахова, Н.Д. Ильинская, А.Н. Именков, С.С. Кижаяев,
С.С. Молчанов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: serguie@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 июля 2004 г.

Источники когерентного излучения изготовлены на основе двойной гетероструктуры InAs/InAsSbP, выращенной методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Модовый состав спектра определяется одновременной вынужденной рекомбинацией на гетерогранице и в объеме активной области, а также негенерируемыми модами с промежуточными частотами. Дополнительные оптические потери на промежуточных модах уменьшают крутизну зависимости интенсивности излучения от тока.

Источники инфракрасного (ИК) излучения в диапазоне длин волн $3 \div 4 \mu\text{m}$ обладают множеством практических приложений. Известно, что молекулы углеводородных соединений и множество других промышленных и природных газов, например CO, CO₂, H₂S, SO₂, NO, NO₂, поглощают ИК-излучение в указанном диапазоне. На основе ИК-излучателей разрабатываются газоаналитические методики контроля технологических процессов и мониторинга окружающей среды. В рассматриваемом диапазоне при комнатной температуре устойчиво работают источники спонтанного излучения, однако для некоторых применений, например молекулярной спектроскопии высокого разрешения, когерентных методов обработки сигналов, необходимы источники с узкой шириной спектра ($10^{-3} \div 10^{-2} \text{ \AA}$). Мы открываем данной работой цикл исследований свойств источников когерентного излучения,

изготовленных на основе структур, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ).

Электролюминесцентные свойства лазеров на основе гетероструктур GaInAsSb/GaAlAsSb I и II рода рассматривались в работе [1]. Механизмы излучательной рекомбинации в лазерах на основе гетероструктур InGaAsSb/InAsSbP I и II типа исследованы в работе [2]. Интерфейсная электролюминесценция в светодиодах на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP наблюдалась в работе [3]. В данной работе мы ставили задачу исследовать спектральные характеристики когерентного излучения, возникающего в диодах на основе двойной гетероструктуры InAs/InAsSbP, выращенной методом МОГФЭ.

Слои выращивались в реакторе горизонтального типа при атмосферном давлении. Подложка размещалась на молибденовом подложкодержателе с резистивным нагревом. Использовались подложки InAs (номер AP-388) с кристаллографической ориентацией (100), легированные цинком до концентрации дырок $p = (5 \div 9.4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Эпитаксиальная часть структуры состояла из барьерного слоя $\text{InAs}_{0.53}\text{Sb}_{0.15}\text{P}_{0.32}$, легированного цинком, с концентрацией дырок $p = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, нелегированной InAs активной области и нелегированного $\text{InAs}_{0.53}\text{Sb}_{0.15}\text{P}_{0.32}$ барьерного слоя. Концентрация носителей заряда в активной области была $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в нелегированном барьерном слое — $n = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Толщины эпитаксиальных слоев были следующими: InAs активная область — $3.3 \mu\text{м}$, каждый из барьерных слоев InAsSbP — $3.5 \mu\text{м}$.

На основе синтезированных структур методом стандартной фотолитографии и мокрого химического травления были изготовлены источники излучения мезаполосковой конструкции по схеме „двойной канал“. Резонаторы Фабри–Перо в чипах формировались скальванием и имели длину $L = 350 \mu\text{м}$. Расстояние между канавками составляло $20 \mu\text{м}$. Ширина контактного полоска была $5 \div 6 \mu\text{м}$. Омические контакты к p - и n -областям формировались методом вакуумного термического испарения многослойной композиции Cr–Au–Ni–Au. В качестве диэлектрического покрытия были опробованы фоторезист, полиэпид, нитрид кремния — Si_3N_4 . Сравнение характеристик диодов показало, что предпочтительнее применение Si_3N_4 . Толщина Si_3N_4 составляла $\sim 1000 \div 1100 \text{ \AA}$.

Были исследованы спектральные характеристики диодов. Исследуемые диоды находились при температуре 77 К. Измерения спектральных

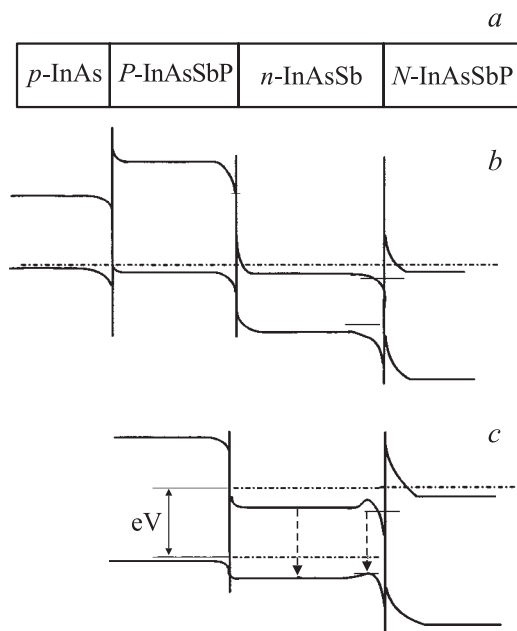


Рис. 1. Схема расположения слоев в лазерной структуре (а) и ее энергетическая диаграмма при нулевом смещении (b) и в лазерном режиме (c).

характеристик проводились при питании импульсным током (длительность импульса $\tau = 500$ ns, частота следования $f = 2$ kHz). При измерении спектров излучение направлялось в решеточный спектрометр и на его выходе детектировалось InSb-фотодиодом, охлажденным жидким азотом. Интенсивность излучения измерялась импульсным синхронным детектором.

Энергетическая диаграмма выращенной структуры изображена на рис. 1. Наличие в светоизлучающей структуре хотя бы одного гетеробарьера приводит к новым каналам как излучательной, так и безызлучательной рекомбинации. Можно ожидать, что в исследуемой полупроводниковой структуре с гетеропереходами II рода одним из механизмов излучательной рекомбинации будет взаимодействие между электронами и дырками на гетерогранице N -InAsSbP/ n -InAs. Согласно работам [4–6], приложение прямого смещения, большего, чем значение

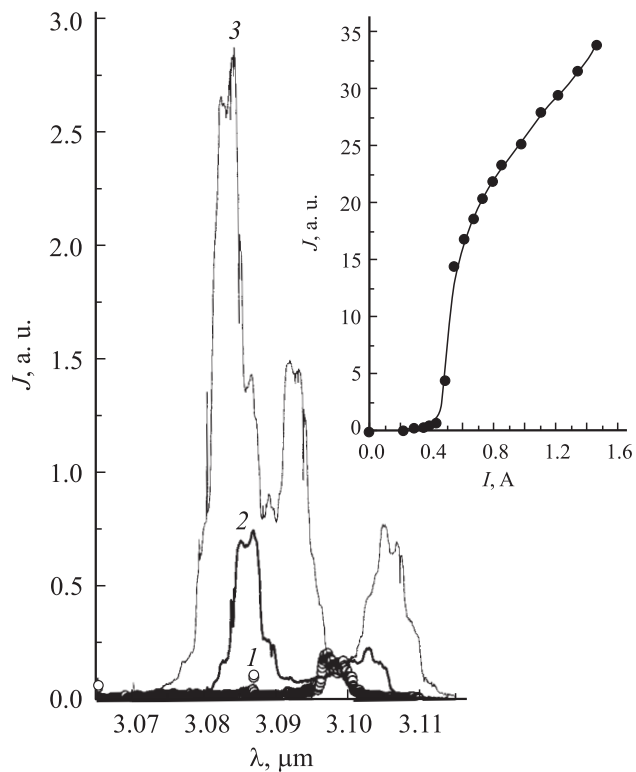


Рис. 2. Спектр излучения лазера при различных токах: 1 — 0.51 А, 2 — 0.55 А, 3 — 0.73 А. На врезке — зависимость интенсивности излучения от тока.

E_g/e , вызывает возникновение самосогласованных пространственно разделенных потенциальных ям для электронов и для дырок в $n\text{-InAs}$ вблизи гетерограницы $n\text{-InAs}/N\text{-InAsSbP}$. Когерентное излучение в такой структуре обеспечивается за счет излучательных переходов между квантовыми состояниями в потенциальных ямах.

На рис. 2 изображены спектры излучения диода с $L = 350 \mu\text{m}$ при различных токах и зависимость интенсивности излучения от тока. Величина порогового тока $I_{th} = 0.425 \text{ A}$. При токе $I = 0.51 \text{ A}$ спектр состоит из одной моды $\lambda \sim 3.097 \mu\text{m}$. С увеличением тока в спектре

проявляется мода $\lambda \sim 3.087 \mu\text{m}$, которая при токе $I = 0.55 \text{ A}$ становится преобладающей. При токе $I = 0.73 \text{ A}$ возникает дополнительная мода $\lambda \sim 3.094 \mu\text{m}$. Зависимость интенсивности излучения от тока более крутая (в 8 раз) в интервале токов $0.425 \div 0.55 \text{ A}$, чем при токах $0.55 \div 1.5 \text{ A}$, что говорит о более высокой излучательной эффективности лазера при токах $I < 0.55 \text{ A}$, чем при значениях $I > 0.55 \text{ A}$. Уменьшение крутизны зависимости интенсивности излучения от тока (рис. 2, вставка) коррелирует с появлением лазерной линии с длиной волны $\lambda = 3.087 \mu\text{m}$. При этом остается и более длинноволновая линия с $\lambda = 3.097 \mu\text{m}$. Необычным является возникновение лазерных линий с промежуточной длиной волны $\lambda = 3.094 \mu\text{m}$. Возможно предположить, что длинноволновая мода соответствует интерфейсной излучательной рекомбинации, так как она возникает в вершине спонтанной полосы. Коротковолновая мода $\lambda = 3.084 \mu\text{m}$, по-видимому, соответствует межзонным переходам. Резкое замедление роста интенсивности излучения с током при значениях $I > 0.55 \text{ A}$ можно объяснить взаимодействием между модами интерфейсной и межзонной излучательной рекомбинации. Присутствие промежуточных мод можно объяснить взаимодействием интерфейсных и межзонных мод. Уменьшение крутизны зависимости суммарной интенсивности излучения при появлении межзонных и промежуточных мод можно объяснить сильным поглощением негенерируемых промежуточных мод.

Работа поддержана грантами РФФИ 02–02–17633 и CRDF RPO–1407–ST–03.

Список литературы

- [1] Баранов А.Н., Джуртанов Б.Е., Именков А.Н., Литвак А.М., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 9. С. 517–522.
- [2] Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н. // ФТП. 1999. Т. 33. В. 2. С. 233–238.
- [3] Krier A., Sherstnev V.V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. С. 101–106.
- [4] Баранов А.Н., Джуртанов Б.Е., Именков А.Н., Рогачев А.А., Шерняков Ю.М., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. II. С. 664–667.
- [5] Баранов А.Н., Джуртанов Б.Е., Именков А.Н., Рогачев А.А., Шерняков Ю.М., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 12. С. 2312–2318.
- [6] Баранов А.Н., Данилова Т.Н., Ершов О.Г., Именков А.Н., Шерстнев В.В. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 22. С. 6–10.