

## ТУННЕЛЬНО-ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ РАЗЪЕДИНЕННОГО ОДИНОЧНОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДА II ТИПА $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$

© К.Д.Моисеев, М.П.Михайлова, О.Г.Ершов, Ю.П.Яковлев

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 11 апреля 1995 г. Принята к печати 18 апреля 1995 г.)

Предложен новый физический подход к созданию полупроводниковой лазерной структуры для среднего ИК диапазона, в которой используется туннельная инжекция носителей через гетерограницу II типа в разьединенном изотипном гетеропереходе  $p\text{-GaInAsSb}/p\text{-InAs}$ . Исследованы спонтанная и когерентная эмиссия в такой лазерной структуре. Была получена одномодовая генерация в импульсном режиме на длине волны  $\lambda = 3.26$  мкм при плотности порогового тока  $J_{th} = 2$  кА/см<sup>2</sup> ( $T = 77$  К). Пороговый ток экспоненциально зависит от температуры,  $I_{th} = I_0 \exp(T/T_0)$ , при этом в интервале температур 77–120 К было получено высокое значение характеристической температуры  $T_0 = 30\text{--}60$  К.

В работе [1] нами была впервые обнаружена интенсивная электролюминесценция в спектральном диапазоне 3–4 мкм на разьединенной изотипной гетероструктуре II типа  $p\text{-GaIn}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}/p\text{-InAs}$ . В спектрах электролюминесценции при приложении смещения соответствующей полярности наблюдались две четко выраженные узкие полосы излучения (1 и 2) с энергиями фотонов в максимуме излучения  $h\nu_1 = 316$  мэВ и  $h\nu_2 = 378$  мэВ при  $T = 77$  К, при этом полуширина полос составляла 10 и 20 мэВ соответственно (рис. 1). Этот экспериментальный факт был объяснен нами при рассмотрении зонной энергетической диаграммы гетероперехода  $p\text{-GaIn}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}/p\text{-InAs}$  (рис. 2).

Ранее нами было установлено [2], что такой гетеропереход является разьединенным гетеропереходом II типа, в котором валентная зона широкозонного материала находится выше по энергии относительно зоны проводимости узкозонного на величину  $\Delta \approx 60\text{--}100$  мэВ. При приложении отрицательного потенциала к  $p\text{-InAs}$  благодаря взаимному смещению зон на гетерогранице (зона проводимости и валентная зона  $\text{InAs}$  сдвигаются вверх, валентная зона и зона проводимости твердого раствора  $\text{GaInAsSb}$  сдвигаются вниз) образуется глубокая квантовая яма для электронов со стороны  $\text{InAs}$ , при этом дырки локализуются в яме на стороне твердого раствора. В такой структуре зон становятся возможными туннельные переходы носителей через гетерограницу

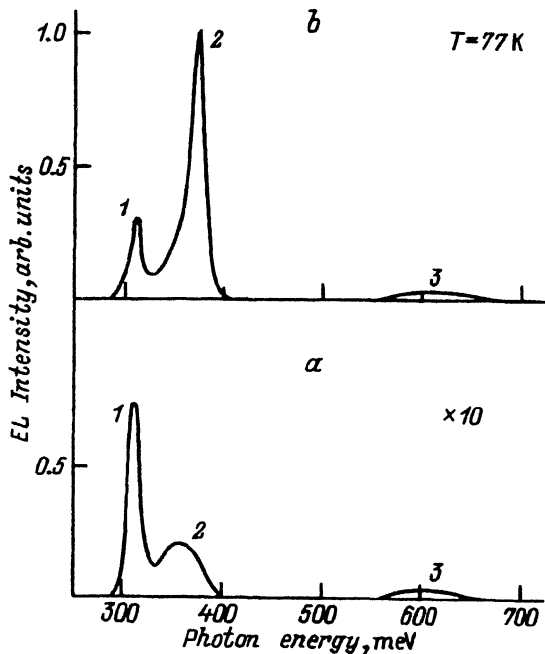


Рис. 1. Спектры электролюминесценции гетероструктуры  $p\text{-GaIn}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}/p\text{-InAs}$  при «обратном» смещении (отрицательный потенциал на подложке  $p\text{-InAs}$ ).  $T = 77\text{ K}$ . Ток через структуру,  $i$ , мА:  $a$  — 50,  $b$  — 100. Пики 1-3 — см. текст.

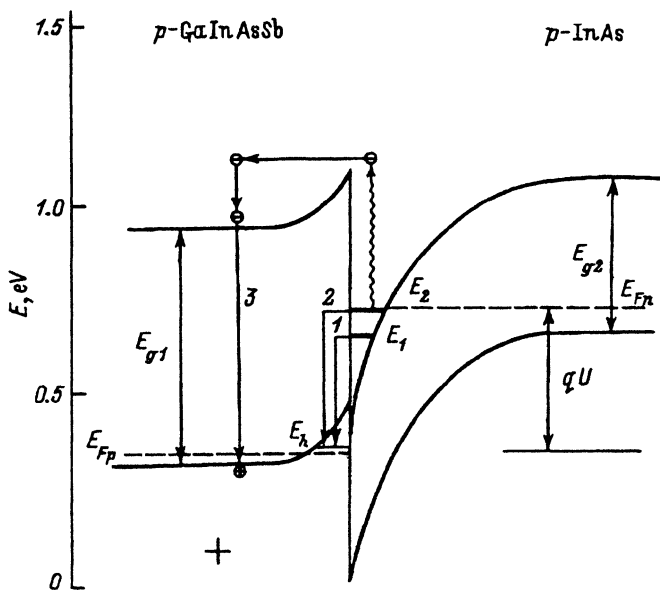


Рис. 2. Зонная энергетическая диаграмма гетероперехода  $p\text{-GaIn}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}/p\text{-InAs}$  при обратном смещении ( $U = 0.48\text{ В}$ ). Стрелки 1, 2, 3 — возможные каналы рекомбинации, соответствующие полосам люминесценции 1, 2, 3 на рис. 1.  $E_1$ ,  $E_2$  — первый и второй уровни электрона в квантовой яме,  $E_h$  — уровень локализации дырок,  $E_{Fn}$ ,  $E_{Fp}$  — квазиуровни Ферми. Волнистая линия — выброс оже-электрона в широкозонный материал GaInAsSb.

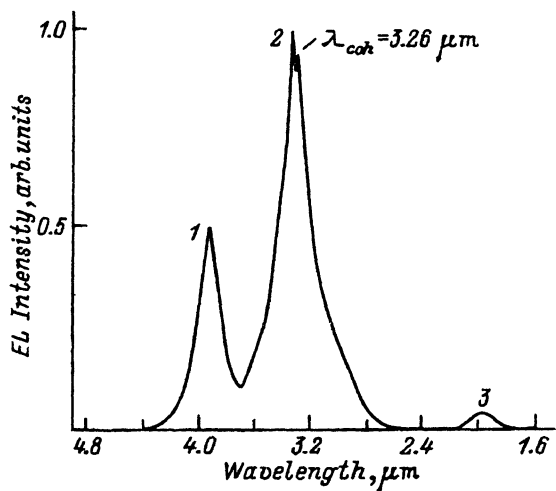
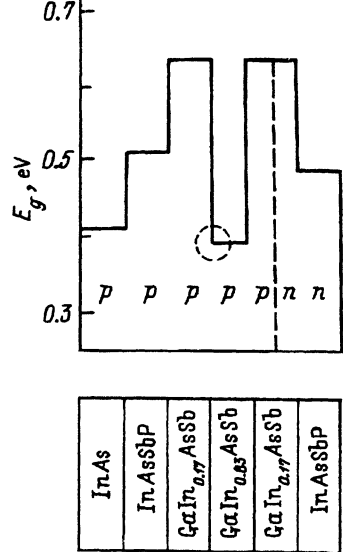


Рис. 3. Послойный профиль ширины запрещенной зоны туннельно-инжектированного лазера.

Рис. 4. Спектр спонтанной электролюминесценции новой лазерной структуры при токе накачки  $i = 100$  мА ( $T = 77$  К).  $\lambda = 3.26$  мкм — длина волны в максимуме когерентного излучения для данной лазерной структуры.

с их последующей рекомбинацией. При увеличении напряжения смещения уровень Ферми пересекает вначале первый уровень размерного квантования электронов в яме, а затем второй. Электроны инжектируются на уровни размерного квантования туннельным образом с акцепторных уровней из объема  $p$ -InAs. Узкие эмиссионные полосы 1 и 2 соответствуют излучательным туннельным переходам с двух уровней размерного квантования электронов в InAs на уровень локализации дырок в твердом растворе GaIn<sub>0.17</sub>As<sub>0.22</sub>Sb. Интенсивность такой интерфейсной излучательной рекомбинации была велика и сопоставима с интенсивностью обычного светодиода, излучающего в том же спектральном диапазоне. Это позволило нам предложить новый физический подход к созданию лазерных структур, используя туннельную инжекцию в разъединенной гетероструктуре.

В данной работе мы впервые сообщаем о создании лазера для диапазона 3–4 мкм, работающего на интерфейсных переходах в разъединенном изотопном  $p$ - $p$ -гетеропереходе II типа.

Лазерные структуры выращивались на подложках InAs (100) с концентрацией  $p = 3 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Послойный профиль ширины запрещенной зоны лазерной структуры с отдельным электронным и оптическим ограничением представлен схематически на рис. 3. В активной области использовался изотипный  $p$ - $p$ -гетеропереход II типа на основе двух твердых растворов GaInAsSb — широкозонного и узкозонного — с разным содержанием In в твердой фазе и с ширинами запрещенных зон  $E_{g1} = 630$  мэВ и  $E_{g2} = 390$  мэВ при  $T = 77$  К соответственно (эта область выделена пунктиром на рис. 3). В широкозонном слое GaIn<sub>0.17</sub>AsSb создавался

$p$ - $n$ -переход, который играл роль дополнительного инжектора электронов. В представленной на рис. 3 лазерной структуре большие разрывы зон на гетерогранице ( $\Delta E_c \approx 0.4 \text{ эВ}$ ) позволяли создавать хорошее электронное ограничение. Для улучшения оптического ограничения использовались слои  $n$ - и  $p$ -типа твердых растворов  $\text{InAsSb}_{0.12}\text{P}_{0.26}$  ( $E_g = 510 \text{ эВ}$  при  $T = 77 \text{ К}$ ). Благодаря большому показателю преломления широкозонного раствора  $\text{GaIn}_{0.17}\text{AsSb}$  (по расчетам  $n = 3.7$ ) по сравнению с напыляемыми слоями ( $n = 3.5$ ) в нашем случае мы ожидали лучшего удержания световой волны в активной области лазера, чем, например, в двойной стандартной гетероструктуре (ДГС) — лазерной структуре на основе  $\text{InAsSbP}/\text{InAs}(\text{Sb})$  [3].

Методом стандартной фотолитографии были изготовлены мезаполосковые лазеры с шириной полоска 30–60 мкм и длиной резонатора 250–500 мкм. Контакты к  $p$ -материалу напылялись из сплава  $\text{Au:Zn}$ , для  $n$ -материала — из сплава  $\text{Au:Te}$ ; затем они вжигались в атмосфере водорода. Образец крепился на держателе в криостате. Регистрируемое излучение выводилось через сколотые грани. Излучение регистрировали с помощью решетчатого монохроматора МДР-4 методом синхронного детектирования. Спектральные измерения проводились при  $T = 77 \text{ К}$  в импульсном режиме с длительностью импульса  $\tau = 100\text{--}300 \text{ нс}$  и частотой повторения  $f = 10^5 \text{ Гц}$ .

Спектр спонтанного излучения новой лазерной структуры представлен на рис. 4. Как видно из рисунка, он подобен спектру электролюминесценции изотипной гетероструктуры  $p\text{-GaIn}_{0.17}\text{As}_{0.22}\text{Sb}/p\text{-InAs}$ , описанной ранее в работе [1] (рис. 1), и содержит также две узкие полосы интерфейсного излучения с энергиями фотона в максимуме  $h\nu_1 = 316 \text{ мэВ}$  и  $h\nu_2 = 368 \text{ мэВ}$  при  $T = 77 \text{ К}$  соответственно, лежащими ниже по энергии, чем ширина запрещенной зоны узкозонного твердого раствора. Это позволило сделать вывод о том, что в новой лазерной структуре мы также имеем дело с излучательными переходами электронов и дырок через гетерограницу.

Созданная новая лазерная структура излучала в режиме генерации на длине волны  $\lambda = 3.26 \text{ мкм}$  ( $h\nu = 378 \text{ мэВ}$ ), при этом плотность порогового тока составляла  $J_{th} = 2 \text{ кА/см}^2$  ( $T = 77 \text{ К}$ ). Спектр излучения был одномодовым. Спектр когерентного излучения на пороге генерации ( $J = 1.05 \cdot J_{th}$ ) представлен на рис. 5. Отметим, что когерентное излучение возникало на высокоэнергетическом склоне спектра спонтанного излучения (отмечено стрелкой на рис. 4), что также отличает данный лазер от обычного ДГС лазера, у которого когерентное излучение возникает на низкоэнергетическом склоне или в максимуме спонтанной полосы. Этот факт мы связываем с излучательной рекомбинацией через квантовые состояния на  $p$ - $p$ -гетерогранице. При увеличении тока концентрация носителей на уровне генерации возрастает, что приводит к увеличению глубины потенциальной ямы (рис. 2) и, как следствие, к увеличению энергетического зазора между уровнями локализации электронов в узкозонном и дырок в широкозонном твердых растворах.

Исследование температурной зависимости порогового тока для новой лазерной структуры показало, что в интервале температур 77–110 К она была слабой и описывалась экспоненциальной зависимостью

$$I_{th} = I_0 \exp(T/T_0),$$

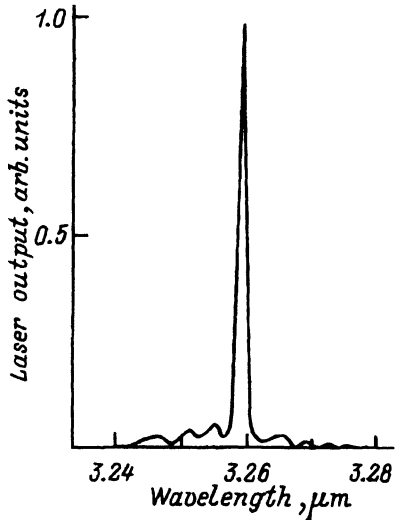


Рис. 5. Спектр когерентного излучения новой лазерной структуры на пороге генерации ( $J = 1.05 \cdot J_{th}$ ) при  $T = 77$  К.

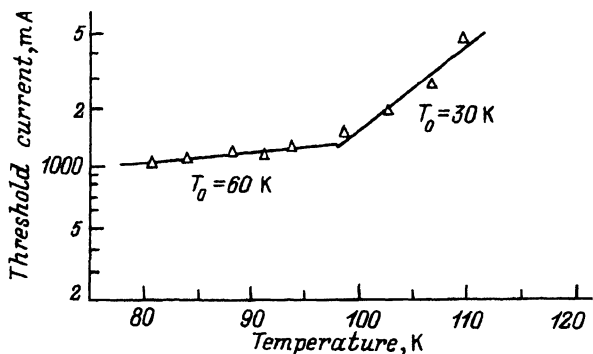


Рис. 6. Температурная зависимость порогового тока.

при этом величина характеристической температуры ( $T_0$ ) в интервале 80–120 К достигала значений  $T_0 = 30$ –60 К (рис. 6). Это значение характеристической температуры превышало максимальное значение  $T_0$  для лазерных структур среднего ИК диапазона на основе узкозонных соединений  $A^{III}B^V$  [3] в 1.5–2 раза, что само по себе существенно.

В работе [4] было показано, что температурная зависимость оже-рекомбинации на гетерогранице II типа ослабляется по сравнению с гетерограницей I типа, что приводит в свою очередь к более слабой температурной зависимости порогового тока в лазерных структурах на основе гетеропереходов II типа. Использование излучательных переходов на гетерогранице через квантовые ямы для создания источников света среднего ИК диапазона позволяет избавиться также от объемной оже-рекомбинации, связанной со спин-орбитальной отщепленной зоной, которая играет важную роль в объемных  $p$ -полупроводниках на основе InAs [5,6]. Мы связываем наличие участка слабой температурной зависимости порогового тока ( $T = 77$ –110 К) в первую очередь с подавлением оже-рекомбинации на гетерогранице II типа.

Возрастание порогового тока при увеличении рабочей температуры ( $T > 120$  К), вероятно, обусловлено вкладом безызлучательной оже-рекомбинации, связанной с  $CHSS$ -процессом [6]. Этот вклад может быть уменьшен при дальнейшей оптимизации конструкции лазерной структуры, например, за счет увеличения высоты гетеробарьеров ( $\Delta E_c \gtrsim 0.6$  эВ) на гетерогранице II типа в активной области лазера, а также использования в качестве покрывающих слоев других твердых растворов. Тем не менее полученные результаты позволяют надеяться на создание лазеров среднего ИК диапазона, работающих вблизи комнатной температуры.

В заключение, в настоящей работе предложена и реализована лазерная структура для спектрального диапазона 3–4 мкм, использую-

чая в активной области изотипный разьединенный  $p$ - $p$ -гетеропереход II типа. Получен одномодовый лазер, излучающий на длине волны  $\lambda = 3.26$  мкм при  $T = 77$  К с плотностью порогового тока  $J_{th} = 2$  кА/см<sup>2</sup>. Достигнуто значение характеристической температуры  $T_0 = 30$ – $60$  К, что является наиболее высоким значением среди известных для узкозонных твердых растворов, работающих в данном спектральном диапазоне.

Авторы благодарят Р.Ф. Казаринова и Г.Г. Зегря за полезные дискуссии и ценные замечания.

Работа частично поддержана Европейским отделением аэрокосмических исследований и разработок (EOARD) США.

#### Список литературы

- [1] М.П. Михайлова, Г.Г. Зегря, К.Д. Моисеев, И.Н. Тимченко, Ю.П. Яковлев. ФТП, **28**, 687 (1994).
- [2] М.П. Михайлова, И.А. Андреев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **28**, 687 (1994).
- [3] A.N. Varanov, A.N. Imenkov, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev. Appl. Phys. Lett., **64**, 2480 (1994).
- [4] G.G. Zegrya, A.D. Andreev. Appl. Phys. Lett. **67**, 2681 (1995).
- [5] Б.Л. Гельмонт, З.Н. Соколова, И.Н. Ясиевич. ФТП, **16**, 592 (1982).
- [6] А.Б. Андаспаева, А.Н. Баранов, Г.Г. Зегря, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев, С.Г. Ястребов. ФТП, **25**, 394 (1991).

Редактор В.В. Чалдышев

### **A tunnel-injection laser based on type II broken-gap $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs single heterojunction**

*K.D. Moiseev, M.P. Mikhailova, O.G. Ershov, Yu.P. Yakovlev*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

A new physical approach is proposed to designing middle-infrared semiconductor laser structure by using tunnel injection of carriers through the heterointerface in an isotype type II broken-gap  $p$ -GaInAsSb/ $p$ -InAs heterojunction. A 5-layers laser structure was grown by LPE on  $p$ -InAs. Spontaneous and coherent emissions were investigated. Single-mode pulse lasing was achieved at  $\lambda = 3.26$   $\mu\text{m}$  at  $T = 77$  K, with threshold current density  $J_{th} = 2$  kA/cm<sup>2</sup>. Exponential dependence of the threshold current density  $J_{th} = J_0 \cdot \exp(T/T_0)$  was obtained in the range  $T = 77$ – $120$  K alongside with a high characteristic temperature  $T_0 = 30$ – $60$  K.