

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 197331

### ГЕТЕРОСТРУКТУРА ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЛАЗЕРА

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО" (Университет ИТМО) (RU)*

Авторы: *Егоров Антон Юрьевич (RU), Новиков Иннокентий Игоревич (RU), Рочас Станислав Станиславович (RU), Карачинский Леонид Яковлевич (RU), Колодезный Евгений Сергеевич (RU)*

Заявка № 2019143336

Приоритет полезной модели 24 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 21 апреля 2020 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 24 декабря 2029 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*H01S 5/187 (2020.02); H01S 5/34366 (2020.02)*

(21)(22) Заявка: 2019143336, 24.12.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
24.12.2019

Дата регистрации:  
21.04.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.12.2019

(45) Опубликовано: 21.04.2020 Бюл. № 12

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр.,  
49, Университет ИТМО, ОИС и НТИ

(72) Автор(ы):

Егоров Антон Юрьевич (RU),  
Новиков Иннокентий Игоревич (RU),  
Рочас Станислав Станиславович (RU),  
Карачинский Леонид Яковлевич (RU),  
Колодезный Евгений Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Национальный  
исследовательский университет ИТМО"  
(Университет ИТМО) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: А. Mereuta "Recent progress in 1.3-  
and 1.5- $\mu\text{m}$  waveband wafer-fused VCSELs",  
Proceedings of the SPIE 2016, vol.10017, 1001702,  
9 стр. RU 2611555 C1, 28.02.2017. US 8451875  
B2, 28.05.2013. US 20060274801 A1, 07.12.2006.

## (54) ГЕТЕРОСТРУКТУРА ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЛАЗЕРА

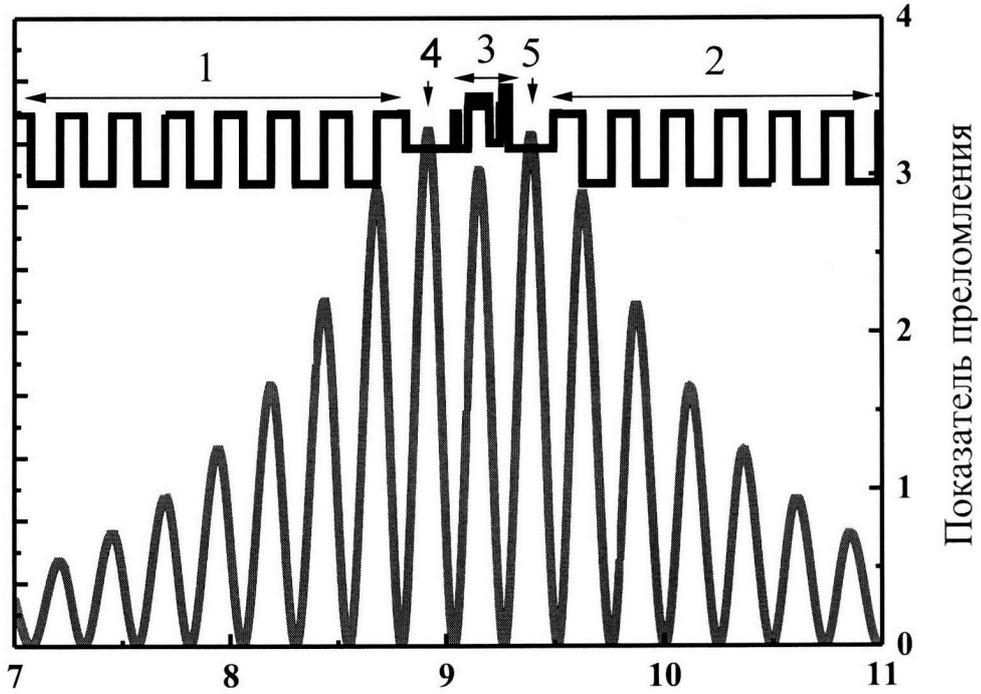
(57) Реферат:

Полезная модель относится к лазерной технике. Гетероструктура вертикально-излучающего лазера состоит из подложки, выполненной из GaAs, верхнего и нижнего распределенных Брэгговских отражателей, выполненных из чередующихся слоев GaAs/AlGaAs, верхнего и нижнего внутрирезонаторных контактных слоев, оптического микрорезонатора с активной областью, образованной квантовыми ямами и разделяющими их барьерными слоями InGaAlAs. При этом суммарная толщина верхнего и нижнего внутрирезонаторных контактных слоев и оптического микрорезонатора с активной

областью составляет полторы длины рабочей длины волны излучения, а активная область образована 10 квантовыми ямами, выполненными на основе  $\text{In}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{As}$  и разделяющими их 9 барьерными слоями, выполненными на основе  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,31}\text{Al}_{0,16}\text{As}$ , и каждый барьерный слой в центре содержит легированный углеродом  $\delta$ -слой с концентрацией  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Технический результат заключается в снижении времени жизни фотонов в резонаторе и повышении дифференциального усиления квантовых ям. 4 з.п. ф-лы, 1 ил.

RU 197331 U1

Интенсивность световой волны, отн.ед.



Расстояние от подложки, мкм

RU 197331 U1

Полезная модель относится к оптоэлектронной технике и может быть использована при изготовлении вертикально-излучающих лазеров, работающих в спектральном диапазоне 1.55 мкм.

Известна монолитная конструкция гетероструктуры для вертикально-излучающих лазеров на основе материалов InAlGaAs/InP с инжекцией носителей через легированные распределенные брэгговские отражатели, выращенная за один эпитаксиальный процесс [M.R. Park et al., All-epitaxial InAlGaAs-InP VCSELs in the 1.3-1.6- $\mu\text{m}$  wavelength range for CWDM band applications, IEEE photonics technology letters 18, 1717 (2006), DOI: 10.1109/LPT.2006.879940]. Недостатком такой конструкции гетероструктуры является ограниченное предельное быстродействие вертикально-излучающих лазеров, обусловленное низкой теплопроводностью слоев InAlGaAs/InAlAs и малым контрастом показателей их преломления.

Известна гибридная конструкция гетероструктуры для вертикально-излучающих лазеров на основе материалов InAlGaAs/InP с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои в сочетании с высококонтрастных диэлектрическими зеркалами (например, CaF<sub>2</sub>/ZnS, AlF<sub>3</sub>/ZnS), имеющими теплопроводность сравнимую с теплопроводностью распределенные брэгговские отражатели GaAs/AlGaAs [S. Spiga, Effect of Cavity Length, Strain, and Mesa Capacitance on 1.5- $\mu\text{m}$  VCSELs Performance, IEEE Journal of Lightwave Technology 35, 3130 (2017), DOI: 10.1109/JLT.2017.2660444]. Недостатком такой конструкции гетероструктуры является высокая чувствительность отражательной способности высококонтрастных диэлектрических зеркал к шероховатости интерфейсов и оптическим неоднородностям слоев, что негативно сказывается как на статических характеристиках таких лазеров, так и на их быстродействии.

Наиболее близкой к предлагаемой полезной модели является конструкция гетероструктуры вертикально-излучающего лазера, состоящая из подложки, выполненной из GaAs, верхнего и нижнего распределенных Брэгговских отражателей, выполненных из чередующихся слоев GaAs/AlGaAs, верхнего и нижнего внутрирезонаторных контактных слоев, оптический микрорезонатор с активной областью, образованной квантовыми ямами и разделяющими их барьерными слоями [Mereuta, Alexandru & Caliman, Andrei & Sirbu, A. & Vladimir, Iakovlev & Ellafi, D. & Rudra, A. & Wolf, P. & Bimberg, Dieter & Kapon, E. (2016). «Recent progress in 1.3- and 1.5- $\mu\text{m}$  waveband wafer-fused VCSELs». 1001702. 10.1117/12.2246208]. Недостатком такой конструкции гетероструктуры является ограниченное быстродействие вертикально-излучающих лазеров, обусловленное во-первых, эффектом демпфирования релаксационных колебаний из-за высокого времени жизни фотонов в резонаторе, присущего удлиненному вертикальному оптическому резонатору с повышенной добротностью, суммарная толщина которого состоит из нижнего внутрирезонаторного контактного слоя на основе InGaAsP/InP n-типа толщиной равной одной рабочей длине волны излучения, оптический микрорезонатор с активной областью толщиной равной половине рабочей длине волны излучения и верхнего внутрирезонаторного контактного слоя на основе InGaAsP/InP n-типа толщиной равной одной рабочей длине волны излучения и составляет две с половиной рабочих длины волны излучения. Во-вторых, использование широких напряженных квантовых ям InGaAlAs, разделенных широкими барьерными слоями InGaAlAs для компенсации упругих напряжений, ограничивает возможное количество квантовых ям в области максимума пространственного распределения стоячей световой волны и плотность их состояния, что в свою очередь ограничивает рост дифференциального усиления квантовых ям [С.А. Блохин и др.,

Влияние потерь на вывод излучения на динамические характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1.55 мкм, изготовленных методом спекания эпитаксиальных пластин, Физика и техника полупроводников 53, 1128 (2019), DOI: 10.21883/FTR.2019.08.48006.9112]. В-третьих, отсутствие легированных барьеров, разделяющих квантовые ямы, также ограничивает рост дифференциального усиления квантовой ямы вследствие менее эффективного транспорта дырок в активную область [R. A Zhang et al., 1.5  $\mu\text{m}$  n-type InGaAsP/InGaAsP modulation-doped multiple quantum well DFB laser by MOCVD, Semiconductor Science and Technology 21, 306 (2006), DOI: 10.1088/0268-1242/21/3/018].

Задачей предлагаемой полезной модели является повышение быстродействия вертикально-излучающего лазера.

Технический результат заключается в снижении времени жизни фотонов в резонаторе и повышении дифференциального усиления квантовых ям.

Технический результат достигается тем, что гетероструктура вертикально-излучающего лазера состоит из подложки, выполненной из GaAs, верхнего и нижнего распределенных Брэгговских отражателей, выполненных из чередующихся слоев GaAs/AlGaAs, верхнего и нижнего внутрирезонаторных контактных слоев, активной области, образованной квантовыми ямами и разделяющими их барьерными слоями InGaAlAs, согласно изобретению, при этом суммарная толщина верхнего и нижнего внутрирезонаторных контактных слоев оптического микрорезонатора с активной областью составляет полторы длины рабочей длины волны излучения, а активная область образована 10 квантовыми ямами, выполненными на основе  $\text{In}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{As}$ , и разделяющими их 9 барьерными слоями, выполненными на основе  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,31}\text{Al}_{0,16}\text{As}$ , и каждый барьерный слой в центре содержит легированный углеродом  $\delta$ -слой с концентрацией  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Причем верхний и нижний внутрирезонаторные контактные слои могут быть выполнены на основе InAlAs и InP, верхний распределенный Брэгговский отражатель выполнен из 20,5 чередующихся пар четвертьволновых слоев на основе GaAs/AlGaAs, и квантовые ямы имеют толщину 2,8 нм, а барьерные слои имеют толщину 7 нм.

На фиг. показано схематическое изображение гетероструктуры вертикально-излучающего лазера на расстоянии от 7 мкм до 11 мкм от подложки GaAs. Приведен профиль показателя преломления (сплошная черная линия, правая ось Y) и профиль распределения интенсивности электромагнитного поля стоячей волны вертикального микрорезонатора (сплошная красная линия, левая ось Y). Расчет профиля пространственного распределения стоячей световой волны выполнен для резонансной длины волны 1.55 мкм.

Предложенная гетероструктура вертикально-излучающего лазера сформирована на подложке из GaAs (на фиг. не показана) и состоит из нижнего распределенного Брэгговского отражателя 1, верхнего распределенного Брэгговского отражателя 2, расположенной между ними активной области 3, нижнего внутрирезонаторного контактного слоя 4, расположенного между активной областью 3 и нижним распределенным Брэгговским отражателем 1, и верхнего внутрирезонаторного контактного слоя 5, расположенного между активной областью 3 и верхним распределенным Брэгговским отражателем 2.

Слои нижнего распределенного Брэгговского отражателя 1 образованы чередующимися парами слоев GaAs/AlGaAs, согласованных по постоянной кристаллической решетки с материалом подложки. Верхний распределенный

Брэгговский отражатель 2 образован 20,5 чередующимися парами слоев GaAs/AlGaAs, согласованных по постоянной кристаллической решетки с материалом подложки. Активная область 3 сформирована из десяти полупроводниковых слоев толщиной 2,8 нм, представляющих собой квантовые ямы на основе  $\text{In}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{As}$ , и 9 слоев толщиной 7 нм, представляющих собой барьеры на основе  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,31}\text{Al}_{0,16}\text{As}$ . Нижний внутрирезонаторный контактный слой 4 сформирован на основе слоев InGaAsP и InP общей толщиной равной половине рабочей длины волны излучения. Верхний внутрирезонаторный контактный слой 5 сформирован из слоев InGaAsP и InP с общей толщиной равной половине рабочей длины волны излучения. Нижний и верхний внутрирезонаторные контактные слои 4 и 5 содержат контактные слои в минимуме интенсивности стоячей волны (на фиг. не показаны).

Предложенная гетероструктура вертикально-излучающего лазера при его работе характеризуется уменьшенной добротностью резонатора, что позволяет уменьшить время жизни фотона и увеличить потери на вывод излучения, что в свою очередь позволяет повысить быстродействие вертикально-излучающего лазера, за счет снижения эффекта демпфирования релаксационных колебаний.

Наряду с этим увеличение количества напряженных квантовых ям в области максимума пространственного распределения стоячей световой волны приводит к росту материального усиления и фактора оптического ограничения активной области и позволяет достичь порогового усиления при меньшей плотности тока накачки, что в свою очередь ведет к росту дифференциального усиления и повышению быстродействия вертикально-излучающего лазера.

Кроме того, наличие  $\delta$ -легированных углеродом барьеров, разделяющих квантовые ямы, улучшает статистику носителей заряда в активной области в сторону баланса между электронным и дырочным заполнением, что приводит к увеличению дифференциального усиления квантовой ямы и увеличению быстродействия лазера [Vahala, Kerry J., and C.E. Zah. «Effect of doping on the optical gain and the spontaneous noise enhancement factor in quantum well amplifiers and lasers studied by simple analytical expressions»). Applied physics letters 52.23 (1988): 1945-1947. <https://doi.org/10.1063/L99584>].

#### (57) Формула полезной модели

1. Гетероструктура вертикально-излучающего лазера, состоящая из подложки, выполненной из GaAs, верхнего и нижнего распределенных Брэгговских отражателей, выполненных из чередующихся слоев GaAs/AlGaAs, верхнего и нижнего внутрирезонаторных контактных слоев, оптического микрорезонатора с активной областью, образованной квантовыми ямами и разделяющими их барьерными слоями InGaAlAs, отличающаяся тем, что

суммарная толщина верхнего и нижнего внутрирезонаторных контактных слоев и оптического микрорезонатора с активной областью составляет полторы длины рабочей длины волны излучения,

а активная область образована 10 квантовыми ямами, выполненными на основе  $\text{In}_{0,74}\text{Ga}_{0,26}\text{As}$ , и разделяющими их 9 барьерными слоями, выполненными на основе  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,31}\text{Al}_{0,16}\text{As}$ ,

и каждый барьерный слой в центре содержит легированный углеродом  $\delta$ -слой с концентрацией  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

2. Гетероструктура вертикально-излучающего лазера по п. 1, отличающаяся тем, что верхний и нижний внутрирезонаторные контактные слои выполнены на основе

**InAlAs и InP.**

3. Гетероструктура вертикально-излучающего лазера по п. 2, отличающаяся тем, что квантовые ямы имеют толщину 2,8 нм.

5 4. Гетероструктура вертикально-излучающего лазера по п. 3, отличающаяся тем, что барьерные слои имеют толщину 7 нм.

5. Гетероструктура вертикально-излучающего лазера по п. 1, отличающаяся тем, что верхний распределенный Брэгговский отражатель выполнен из 20.5 чередующихся пар четвертьволновых слоев GaAs/AlGaAs.

10

15

20

25

30

35

40

45

