

## Мощные светодиоды, излучающие в области длин волн 1.9–2.1 мкм

© Т.Н. Данилова, Б.Е. Журтанов, А.Л. Закгейм, Н.Д. Ильинская, А.Н. Именков, О.Н. Сараев, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 14 мая 1998 г. Принята к печати 20 мая 1998 г.)

Созданы и исследованы светодиоды, излучающие в области длин волн 1.9–2.1 мкм, на основе двойных гетероструктур AlGaAsSb/GaInAsSb/AlGaAsSb с большим содержанием As(64%) в широкозонных областях. Светодиоды имеют конструкцию, позволяющую расположить активную область близко к отводящим тепло частям корпуса, а свет вывести через подложку GaSb, незащищенную контактом. Светодиоды обладают в большом интервале токов линейной зависимостью мощности излучения от тока. Достигнута в квазинепрерывном режиме мощность излучения 4.6 мВт, а в импульсном режиме пиковая мощность 190 мВт при комнатной температуре. Показано, что еще при длительностях импульса 5 мкс переход от линейной к сублинейной зависимости мощности излучения от тока определяется не нагревом, а процессами оже-рекомбинации в активной области светодиода.

1. В спектральном диапазоне 1.9–2.1 мкм имеются линии поглощения паров воды, CO<sub>2</sub> и других газов, что делает источники излучения в этой спектральной области перспективными для создания газоанализаторов. Приборы для измерения влажности широко используются в технике, в частности для технологического контроля [1]. Источники излучения в этой спектральной области могут применяться в медицине, например для измерения содержания сахара в крови.

Несмотря на то что в этой спектральной области работают лазеры при комнатной температуре [2–5], в ряде практических применений, не требующих высокого спектрального разрешения, используются светодиоды и даже тепловые источники излучения. Лазеры являются, с одной стороны, более дорогостоящими приборами, а с другой — совмещение узкой линии излучения лазера с линией поглощения газа усложняет измерительную установку, когда используется прецизионный температурный подогрев. По сравнению с тепловыми источниками излучения светодиоды имеют то преимущество, что они излучают достаточно узкую спектральную линию, поэтому не требуют применения оптических фильтров, и кроме того допускают электрическую модуляцию вместо использования механических модуляторов.

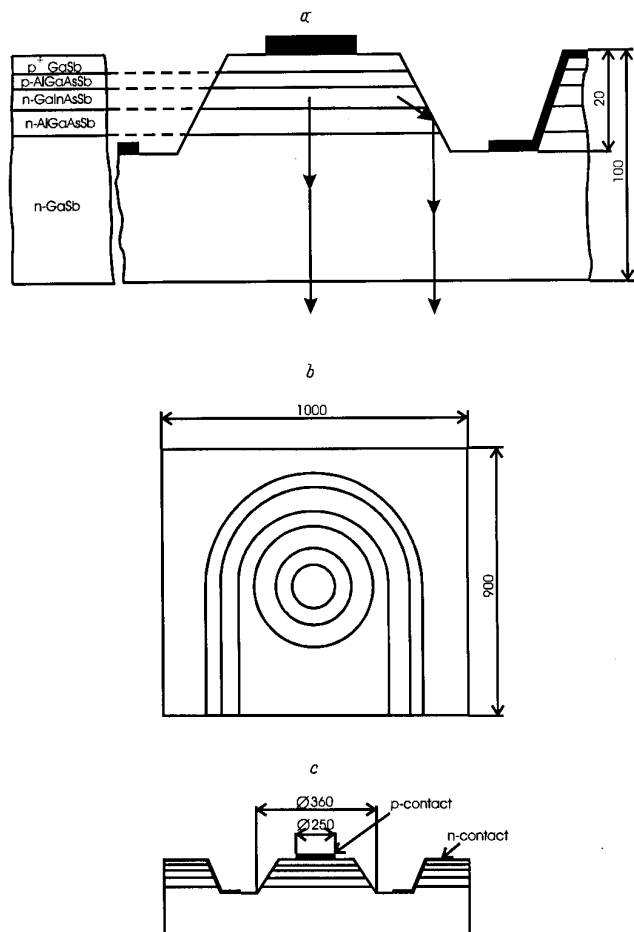
Данная работа является продолжением наших работ по созданию и исследованию светодиодов на основе гетероструктур GaInAsSb/AlGaAsSb, излучающих в спектральной области 1.8–2.2 мкм [6–9]. Цель работы разработка конструкции, изготовление и исследование светодиодов с минимизированным тепловым сопротивлением, что позволяет увеличить внешний квантовый выход и интервал токов, в котором интенсивность излучения пропорциональна току.

2. Исследуемые светодиоды изготавливались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на основе гетероструктур GaInAsSb/AlGaAsSb, выращенных на подложке *n*-GaSb (100), легированной Te до концентрации свободных электронов  $(8–9) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Светодиоды имели структуру (рис. 1, *a*), в которой узкозонный

активный слой был заключен между широкозонными эмиттерами. Преимущество структуры светодиодов с двумя широкозонными эмиттерами по сравнению с одним широкозонным эмиттером показано в работе [8]. Все выращенные слои изопериодны с подложкой. Величина рассогласования периодов решетки подложки и узкозонного слоя  $\Delta a/a = (8–9) \cdot 10^{-4}$ , а подложки и широкозонного слоя  $\Delta a/a = 1.37 \cdot 10^{-3}$ . Узкозонный слой состава Ga<sub>1–*x*</sub>In<sub>*x*</sub>As<sub>*y*</sub>Sb<sub>1–*y*</sub>, где  $x \sim 0.1$ ,  $y \sim 0.08$ , легировался Te до концентрации свободных электронов  $(7–8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Толщина узкозонного слоя — 2 мкм. Широкозонные слои выращивались с большим содержанием Al, чем у широкозонных слоев светодиодов, исследованных в предыдущих работах [5–9], и имели состав Al<sub>0.64</sub>Ga<sub>0.36</sub>As<sub>0.44</sub>Sb<sub>0.956</sub>. Широкозонный *N*-слой легировался Te до концентрации свободных электронов  $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Широкозонный *P*-слой легировался Ge до концентрации свободных дырок  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Толщина *N*-слоя — 1.5 мкм. Толщина *P*-слоя — 1.7 мкм. С целью создания низкоомного контакта широкозонный *P*-слой покрыт слоем *P*<sup>+</sup>-GaSb с большей степенью легирования концентрации свободных дырок в нем  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Толщина этого слоя  $\sim 3$  мкм.

Расчетное значение ширины запрещенной зоны при комнатной температуре в узкозонной области  $E_g \sim 0.64$  эВ, а в широкозонной области  $E_g = 1.23$  эВ.

Конструкция светодиода, представленная на рис. 1, оптимизирована с целью уменьшения теплового сопротивления и увеличения выхода излучения. Для этого вначале с помощью фотолитографии с глубоким травлением в подложку из выращенных эпитаксиальных структур создаются круглые мезодиоды. Контакты наносятся на одну структуру таким образом, чтобы *n*- и *p*-контакты находились на одной поверхности. Вид на светодиод со стороны контактных площадок показан на рис. 1, *b*. Для электрической изоляции контактов служит кремниевая пластина, обладающая хорошей теплопроводностью. На эту пластину методом фотолитографии были нанесены контактные слои, к которым подпаивались контактные



**Рис. 1.** Конструкция светодиода: *a* — расположение слоев структуры, *b* — вид со стороны контактных площадок, *c* — вид поперечного сечения светодиода. Линейные размеры приведены в мкм. Стрелками показано направление выхода излучения из структуры.

слои светодиода путем совмещения и последующего нагревания. Общий вид светодиода в поперечном сечении представлен на рис. 1, *c*. В такой конструкции активная область расположена ближе к теплоотводу, чем в том случае, если она лежит на толстой подложке. Свет из активной области выходит, как показано стрелками на рис. 1, *a*, через подложку, совершенно не заслоненную контактом.

На наружную поверхность светодиода наносится оксидный компаунд в виде линзы высотой  $\sim 2.4$  мм, обеспечивающей расходимость потока излучения на половине максимальной высоты интенсивности 16–20 градусов.

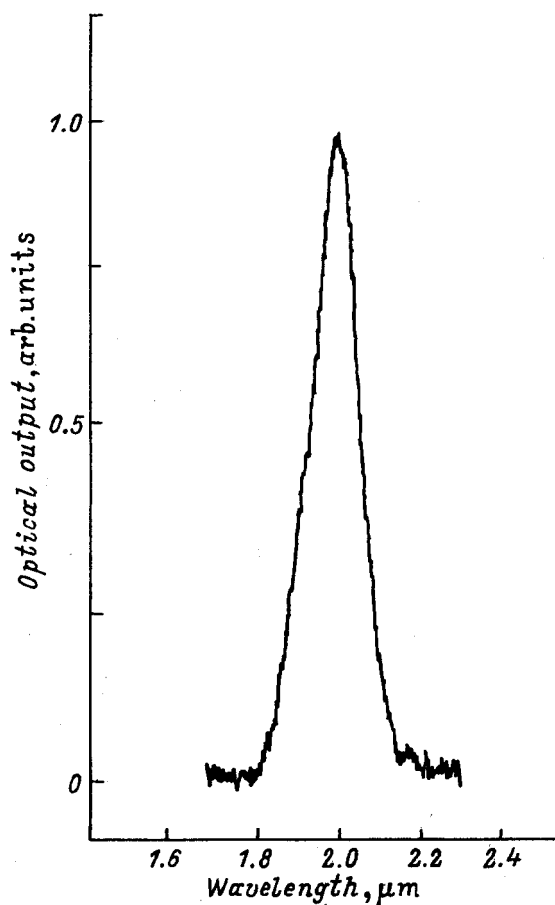
У исследованных светодиодов измерялись спектры излучения, зависимость мощности излучения от тока, квантовый выход, характеристика ток–напряжение.

Спектральные характеристики светодиодов были исследованы с помощью стандартной схемы синхронного детектирования, монохроматора МДР-2 и, в качестве приемника, фотодиода на основе GaInAsSb [10]. Оптическая мощность регистрировалась прибором ИМО-2М.

Измерения проводились при питании светодиодов в квазинепрерывном режиме импульсами тока типа меандр с частотой следования 400 Гц и в импульсном режиме импульсами тока длительностью ( $\tau$ ) 5, 10, 20 мкс с частотой следования 1 кГц. Светодиоды исследовались при комнатной температуре.

3. Спектры излучения при комнатной температуре содержат одну полосу (рис. 2). Длина волны излучения в максимуме практически линейно зависит от состава твердого раствора в активной области и изменяется от 1.9 до 2.1 мкм. Полуширина полосы излучения, т. е. полная ширина на половине максимальной высоты, имеет величину 0.17 мкм при токе 50 мА и 0.18 мкм при токе 200 мА. С увеличением тока от 50 до 200 мА максимум полосы излучения смещается в длинноволновую сторону на 0.015–0.017 мкм.

Оптические мощности излучения ( $P$ ) и их зависимости от тока инжекции ( $I$ ) исследуемых светодиодов в квазинепрерывном режиме представлены на рис. 3. Максимальная величина оптической мощности 4.6 мВт получена при токе 200 мА. В интервале токов 50–200 мА зависимость  $P(I)$  практически линейная. При больших токах измерения проводились в импульсном режиме питания, но длительности импульса ограничивались микросекун-



**Рис. 2.** Спектр излучения светодиода E-41 N21, квазинепрерывный режим питания, ток 100 мА, комнатная температура.

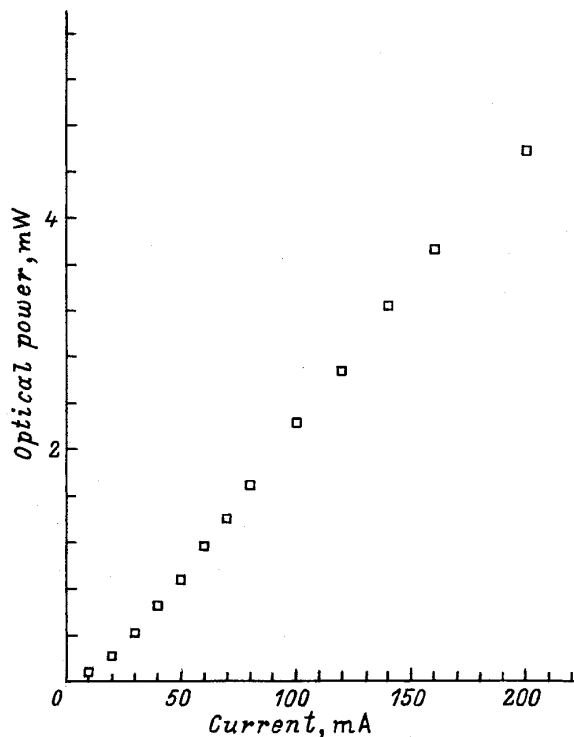


Рис. 3. Зависимость мощности излучения от тока в квазинепрерывном режиме при комнатной температуре светодиода E-41 N 21.

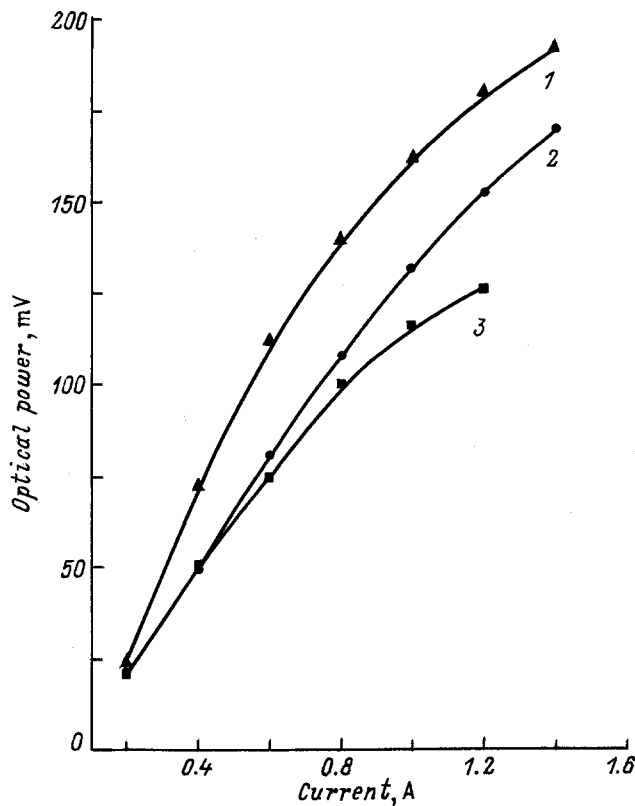


Рис. 4. Зависимость мощности излучения от тока в импульсном режиме при комнатной температуре светодиода T-41 N 21. Длительности импульсов  $\tau$ , мкс: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 20. Частота следования импульсов 1 кГц.

дами (рис. 4). Как видно, в этом случае зависимость  $P(I)$  имеет практически линейный характер до токов  $\sim 520$  мА. Затем зависимость переходит в сублинейную при всех трех длительностях импульса,  $\tau = 5, 10, 20$  мкс, представленных на рисунке. Максимальная достигнутая пиковая мощность излучения — 190 мВт при токе 1.4 А при длительности импульса 5 мкс и частоте следования 1 кГц.

Измеренный внешний квантовый выход исследованных светодиодов имел при комнатной температуре значение  $\sim 4\%$ .

Измерение вольт-амперных характеристик исследованных светодиодов показало, что при комнатной температуре при прямом смещении они имеют прямолинейный участок, дающий отсечку 0.5 В и наклон, соответствующий остаточному сопротивлению в пределах 2.2–2.8 Ом.

#### 4. Обсудим полученные результаты.

Исследованные в данной работе светодиоды имели по сравнению со светодиодами, изготовленными и исследованными нами ранее [6–9], несколько усовершенствований. Во-первых, они имеют более широкозонные эмиттеры с содержанием Al  $\sim 64\%$ , во-вторых, конструкция этих светодиодов позволяет расположить активную область ближе к отводящему тепло корпусу прибора и выводить излучение через подложку, незащеленную контактом.

Нужно отметить, что получение широкозонных слоев AlGaAsSb с содержанием Al  $\sim 64\%$  методом жидкофазной эпитаксии является рекордным.

Значения последовательных сопротивлений светодиодов показывают, что, несмотря на увеличение ширины запрещенной зоны эмиттерных слоев, применение сильно легированного  $P^+$ -слоя в предконтактной области оказалось достаточным, чтобы последовательные сопротивления не возросли по сравнению с последовательными сопротивлениями прежних светодиодов [9]. Тем не менее нагрев током активной области исследованных светодиодов заметен, поскольку происходит сдвиг максимума спектра излучения в длинноволновую сторону и некоторое расширение полосы излучения с увеличением тока от 50 до 200 мА в квазинепрерывном режиме. Однако нагрев этот не очень большой, зависимость  $P(I)$  в этом интервале токов остается практически линейной (рис. 3). Линейной остается зависимость и при увеличении тока до  $\sim 520$  мА в импульсном режиме при использовании микросекундных импульсов (рис. 4). Появление сублинейной зависимости  $P(I)$  с дальнейшим увеличением тока может быть вызвано двумя причинами — нагревом активной области и увеличением потерь тока за счет оже-рекомбинации. Если зависимость  $P(I)$  представить в степенном виде,  $P \sim I^n$ , то в том случае, когда сублинейность определяется оже-рекомбинацией,  $n$  должно быть равно  $2/3$ . Анализ показал, что в импульсном режиме при  $I > 0.520$  А при  $\tau = 5$  мкс  $n = 2/3$ , при  $\tau = 10$  мкс  $n = 11/21$  и при  $\tau = 20$  мкс  $n = 2/7$ . Это означает, что при длительности импульса

5 мкс сублинейность зависимости  $P(I)$  определяется оже-рекомбинацией. Уменьшение длительности импульса по сравнению с 5 мкс не приведет к продлению прямолинейного участка зависимости  $P(I)$  при токах  $I > 0.520$  А. При длительностях импульса  $\tau = 10$  и 20 мкс сублинейность зависимости  $P(I)$  определяется не только оже-рекомбинацией, но и нагревом.

Максимальные оптические мощности 4.6 мВт в квази-непрерывном режиме и 190 мВт в импульсном режиме являются значительными величинами для источников спонтанного излучения в области длин волн  $\sim 2$  мкм.

Таким образом, благодаря использованию симметричной двойной гетероструктуры с большим содержанием Al (64%) в широкозонных областях и разработке конструкции, позволяющей расположить активную область близко к отводящему тепло основанию корпуса и световой поток вывести через подложку, незаслоненную контактом, получены светодиоды, излучающие большие оптические мощности, 4.6 мВт при 200 мА в квази-непрерывном режиме и пиковую мощность 190 мВт при токе 1.4 А в импульсном режиме. Показано, что при длительностях импульса 5 мкс переход зависимости  $P(I)$  от линейной к сублинейной определяется не нагреванием активной области, а процессами оже-рекомбинации в ней.

Работа частично поддержана контрактом INCO–Сореникус N 1C15-CT97-0802 (DG12-CDPF) и частично грантом Министерства науки РФ по программе "Оптика и лазерная физика".

## Power light-emitting diodes operating in the spectral range of 1.9–2.1 $\mu\text{m}$

T.N. Danilova, B.E. Jurtanov, A.L. Zakgeim, N.D. Ilinskaya, A.N. Imenkov, O.N. Saraev, M.A. Sipovskaya, V.V. Sherstnev, Yu.P. Yakovlev

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

**Abstract** Light-emitting diodes (LEDs) operating in the spectral range of 1.9–2.1  $\mu\text{m}$  have been fabricated by a liquid-phase epitaxy on the base of AlGaAsSb/GaInAsSb double heterostructures with a high Al (64%) content in wide-gap layers. The design of LED makes it possible to dispose  $n$ - and  $p$ -contacts in the same plane upon the silicon holder and let the light go through a GaSb substrate. LEDs are investigated in a quasi-continuous-wave (CW) and pulse regime at room temperature. LEDs possess a linear current dependence of the optical power within a wide range of currents. The CW optical power as high as 4.6 mW and peak optical power of 190 mW in pulse regime were achieved at 300 K. It has been shown that the deviation from linear to sublinear current dependence of optical power is determined by Auger recombination in the pulse regime, the pulse duration being less than 5  $\mu\text{s}$

Phone: (812) 247 9956

Fax: (812) 247 0006

E-mail: yak@iroptl.ioffe.rssi.ru

## Список литературы

- [1] А.Н. Баранов, Ю.П. Яковлев, А.Н. Именков, М.П. Михайлова, А.И. Климентенко, В.Л. Шутов. Бумаж. пром-сть, № 9, 20 (1989).
- [2] Л.М. Долгинов, Л.В. Дружинина, И.В. Крюкова, А.Н. Лапшин, Е.В. Матвеевко, М.Г. Мильвидский. Квант. электрон. 5, 26 (1978).
- [3] А.Н. Баранов, Б.Е. Джуртанов, А.Н. Именков, Ю.М. Шерняков, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, 12, 9, 557 (1986).
- [4] H.K. Choi, S.J. Eglash, M.K. Conners. Appl. Phys. Lett., 63, 3271 (1993).
- [5] D.Z. Garbuzov, R.H. Martinelli, H. Lee, R.J. Menna, P.K. York, L.A. DiMareo, M.G. Marvey, R.J. Matarese, S.Y. Narayan, J.C. Connolly. Appl. Phys. Lett., 70, 2931 (1997).
- [6] А. Андаспаева, А.Н. Баранов, А.А. Гусейнов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, Е.А. Сидоренкова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, 15, 18, 71 (1989).
- [7] А.А. Андаспаева, А.Н. Баранов, А.А. Гусейнов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, Ю.П. Яковлев. ФТП, 24, 1708 (1990).
- [8] А.А. Попов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, 23, 18, 12 (1997).
- [9] А.А. Попов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, 23, 20, 19 (1997).
- [10] И.А. Андреев, А.Н. Баранов, М.А. Афрайлов, В.Г. Данильченко, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. Письма ЖТФ, 12, 21, 1311 (1986).

Редактор В.В. Чалдышев