

Высокоэффективные светодиоды на основе тиристорной гетероструктуры II типа $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/P\text{-AlGaAsSb}$

© Н.Д. Стоянов[¶], Б.Е. Журтанов, А.Н. Именков, А.П. Астахова, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 23 октября 2006 г. Принята к печати 3 ноября 2006 г.)

Предложен новый тип светодиодов — высокоэффективный светодиод с максимумом излучения на длину волны $\lambda = 1.95$ мкм на основе тиристорной гетероструктуры $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/P\text{-AlGaAsSb}$ и исследованы его электрические и люминесцентные характеристики. Показано, что в тиристорной структуре эффективная излучательная рекомбинация происходит в активной области GaInAsSb n -типа за счет двухсторонней инжекции дырок из соседних p -областей. В исследуемой структуре получен максимальный внутренний квантовый выход в импульсном режиме 77%. Средняя оптическая мощность достигала 2.5 мВт, а пиковая мощность в импульсном режиме 71 мВт и превышала в 2.9 раза величину мощности, полученную для стандартного светодиода $n\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/P\text{-AlGaAsSb}$, излучающего в том же спектральном диапазоне. Предложенный подход позволит улучшить параметры светодиодов во всем среднем инфракрасном диапазоне (2–5 мкм).

PACS: 85.60.Jb, 78.60.Fi, 85.30.Rs, 78.55.Cr

1. Введение

Гетеропереходы II типа на основе твердых растворов GaInAsSb/AlGaAsSb широко используются для создания оптоэлектронных приборов — светодиодов [1,2], лазеров [3,4], фотодиодов [5,6] для спектрального диапазона 1.6–2.5 мкм, важного для экологического мониторинга и медицинской диагностики. Проблема повышения квантовой эффективности и мощности светодиодных структур заставляет искать нетрадиционные подходы к конструкции излучающих приборов. Впервые в работах Алфёрова с сотр. [7] была предложена тиристорная $p\text{-}n\text{-}p$ -структура на основе GaAs–AlAs для улучшения электролюминесцентных характеристик и создан гетеролазер — тиристор (динистор) [8]. Эта идея нашла свое развитие в недавно появившихся работах, посвященных созданию биполярного светоизлучающего транзистора на основе гетероперехода II типа GaAsSb/InP [9]. Получено лазерное излучение на длине волны $\lambda = 980$ нм в гетеропереходном биполярном транзисторе в системе InGaP–GaAs–InGaAs [10]. В настоящей работе представлены результаты исследования новой светодиодной структуры тиристорного типа $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/P\text{-AlGaAsSb}$ с максимумом излучения при $\lambda_{\text{max}} = 1.95$ мкм. Применение тиристорной структуры позволило нам увеличить оптическую мощность более чем в 2 раза по сравнению с мощностью диодной структуры, излучающей в том же спектральном диапазоне.

2. Конструктивные особенности светодиодной структуры

Светодиодные структуры были выращены методом жидкофазной эпитаксии. Энергетическая диаграм-

ма тиристорной структуры $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/P\text{-AlGaAsSb}$ представлена на рис. 1. На подложке GaSb n -типа выращивался толстый (до 10 мкм) буферный слой $n\text{-GaSb}$ из расплава свинца. Из предыдущих исследований гетероструктур на основе GaSb известно, что существенное негативное влияние на эффективность излучательной рекомбинации оказывают глубокие уровни двухзарядного структурного дефекта кристаллической решетки [11]. Концентрация природных структурных дефектов, связанных со стехиометрией, зависит от соотношения атомов сурьмы и галлия в растворе–расплаве. В [12] был предложен метод изменения этого соотношения путем введения свинца в качестве нейтрального растворителя. Было установлено, что при этом концентрация структурных дефектов может быть уменьшена от $2.7 \cdot 10^{17}$ до $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. В качестве активного слоя использовался четверной твердый раствор $n\text{-GaInAsSb}$ с содержанием индия 9%. Такое содержание индия соответствует ширине запрещенной зоны $E_g = 0.638$ эВ. Для получения тиристорного эффекта между буферным и активным слоем был вставлен тонкий (0.5 мкм) слой GaSb p -типа. В качестве ограничительного слоя для электронов использовался четверной твердый раствор AlGaAsSb, изопериодический с подложкой GaSb с содержанием алюминия 34% ($E_g = 1.1$ эВ).

Важным фактором, ограничивающим квантовый выход всех светодиодных структур для спектрального диапазона 1.6–2.4 мкм, является отсутствие барьера для дырок и, как следствие, их утечка через гетеропереход II типа. Широкозонные слои AlGaAsSb обеспечивают высокий барьер для электронов, но барьер для дырок $\Delta E_B < 0.1$ эВ. Для преодоления этого недостатка было предложено использовать тиристорную структуру на основе $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$, в которой обеспечивается эффективная локализация электронов и дырок вблизи границы гетероперехода II типа $p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}$ и двухсторонняя инжекция дырок в активную область.

[¶] E-mail: ns@iropt6.ioffe.ru
FAX: (812)2970006

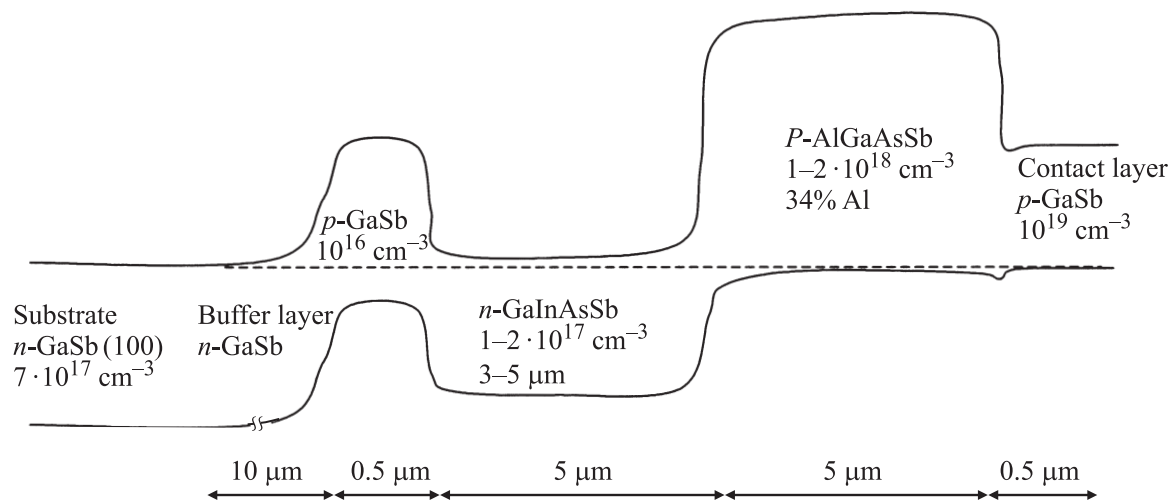


Рис. 1. Энергетическая диаграмма светодиодной структуры тиристорного типа.

3. Электрические и оптические характеристики светодиода

S-образная вольт-амперная характеристика структуры (рис. 2) имела типичный для тиристорных структур вид. Как ранее отмечалось в [7], наличие участка отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперной характеристике электролюминесцентных источников света значительно расширяет область их применения и упрощает большинство схем, связанных с передачей и обработкой информации. Напряжение включения V_S для нашей структуры было равно 1.9 В. Ток включения при этом I_S составил 7.5 мА. Во включенном состоянии напряжение резко падало до 0.45 В. При подаче прямого смещения на структуру в целом („+“ к p -GaSb, „-“ к n -GaSb) гетеропереход между встроенным p -слоем GaSb и активным слоем n -GaInAsSb оказывается включенным в обратном направлении (рис. 3, $I < I_S$). Практически все приложенное напряжение падает на этот переход. В то же время переходы между n -GaSb и встроенным слоем, а также между p -AlGaAsSb и n -GaInAsSb включены в прямом направлении. Инжек-

тированные с этих переходов носители пролетают соответственно встроенный слой и слой активной области и накапливаются с двух сторон обратного смещенного перехода между p -GaSb и n -GaInAsSb (положительный заряд на p -GaSb и отрицательный на n -GaInAsSb). При определенном напряжении накопленный с двух сторон границы заряд перекоменсирует внешнее приложенное напряжение и происходит переключение тиристора. Высота обратного включенного барьера p -GaSb/ n -GaInAsSb резко падает за счет накопленного с двух сторон границы заряда дырок и электронов (рис. 3, переход из состояния $I = I_S$ в состояние $I > I_S$). Во включенном состоянии тиристора происходит двухсторонняя инжекция дырок в активную область n -типа из соседних областей p -GaSb и p -AlGaAsSb. Создаются максимально благоприятные условия для эффективной излучательной рекомбинации в активной области.

На рис. 4 представлены спектры электролюминесценции тиристорной структуры, измеренные в квазистационарном (а) и импульсном (b) режимах. Полуширина спектра $\Delta\lambda$ составила 150 нм при токе 200 мА и 160 нм при токе 400 мА. Максимум излучения смещался от 1.95 мкм ($E_g = 0.636$ эВ) при токах меньше 200 мА до 1.97 мкм ($E_g = 0.629$ эВ) при токе 400 мА за счет локального нагрева структуры при протекании больших токов.

Следует отметить, что в диодных структурах n -GaSb/ n -GaInAsSb/ p -AlGaAsSb, излучающих в том же спектральном диапазоне, ток 200 мА являлся предельно допустимым. При его превышении эффективность излучения резко падала. Тиристорные структуры работали стабильно при токах до 400 мА (плотность тока 445 А/см²) и выше. На рис. 5 сравниваются зависимости мощности от тока (а) и внутреннего квантового выхода от тока (b) для двух светодиодных структур, излучающих на длине волны 1.95 мкм — диодной и тиристорной. В тиристорной структуре был получен

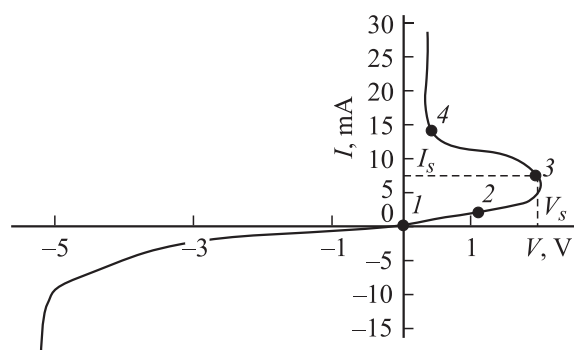


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика тиристорной светодиодной структуры при $T = 22^\circ\text{C}$.

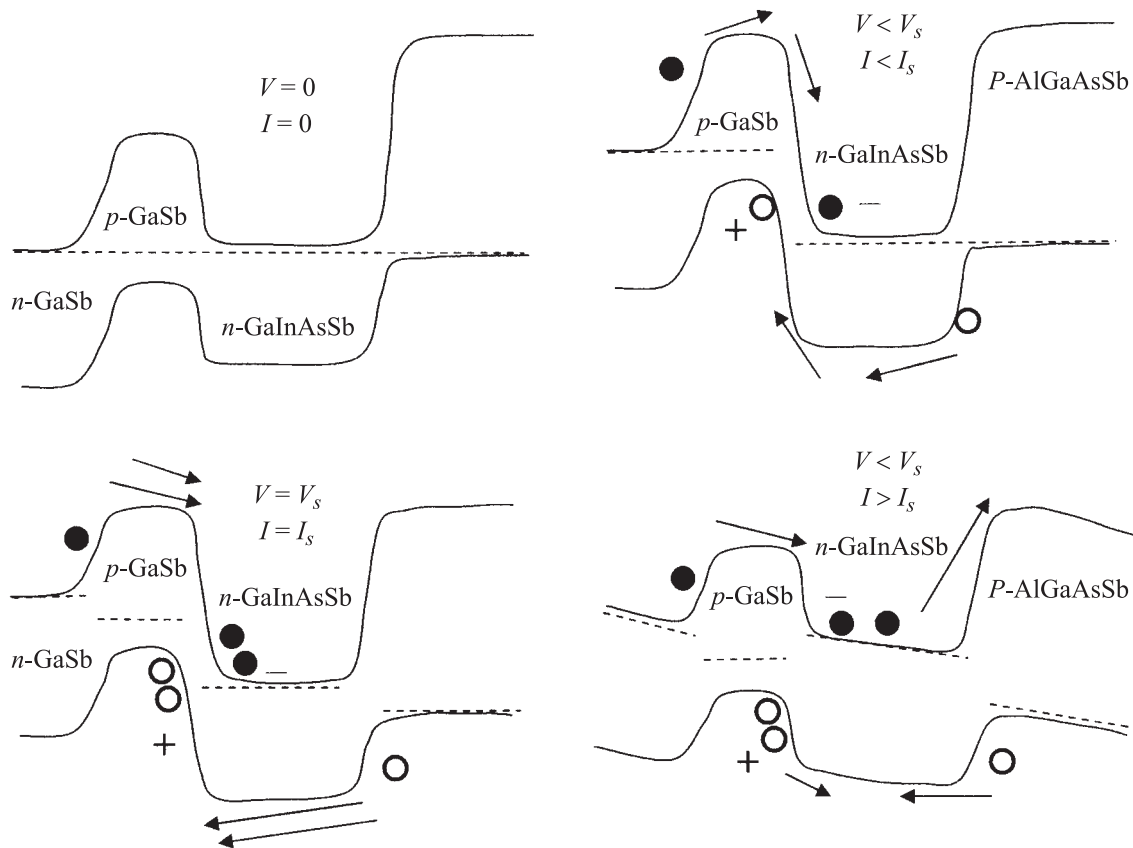


Рис. 3. Энергетические диаграммы тиристорной структуры в разных точках вольт-амперной характеристики ($I = 0$, $I < I_s$, $I = I_s$, $I > I_s$).

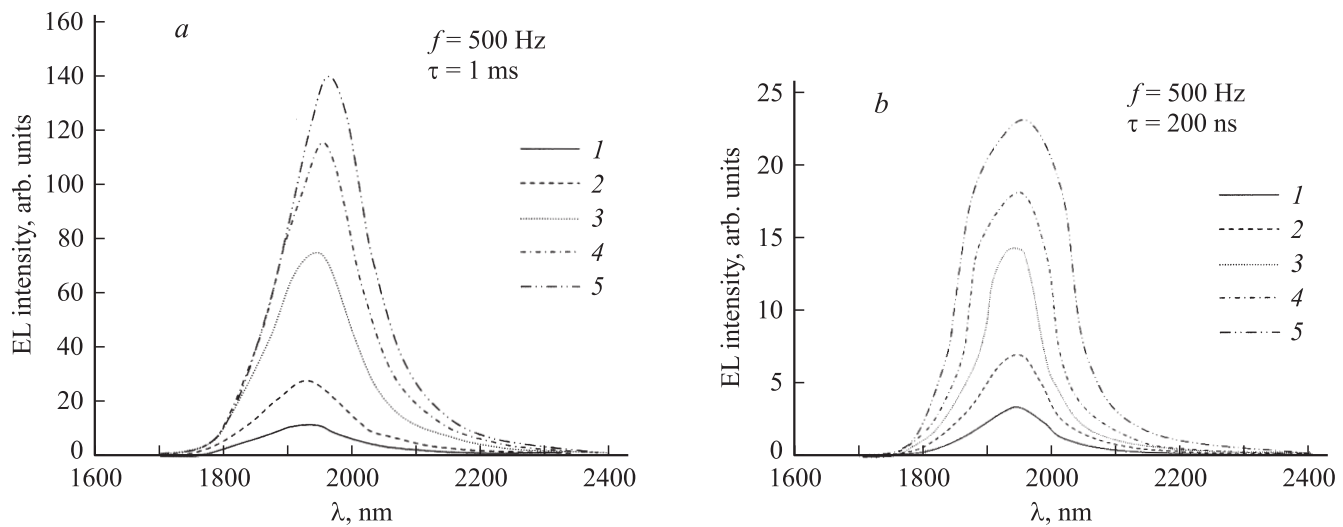


Рис. 4. Спектры тиристорной светодиодной структуры, измеренные в разных импульсных режимах. *a* — скважность $Q = 2$, $\tau = 1$ мс, I , мА: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 200, 4 — 300, 5 — 400. *b* — скважность $Q = 1000$, $\tau = 200$ нс, I , А: 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3, 4 — 5, 5 — 10.

Сравнение параметров светодиодных гетероструктур с четверным твердым раствором $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{AsSb}$ ($x = 0.09$) в активной области, измеренных в квазинепрерывном режиме ($f = 500$ Гц, $T = 22^\circ\text{C}$)

Параметры структуры	Диодная ($I = 200$ мА)	Тиристорная ($I = 200$ мА)	Тиристорная ($I = 400$ мА)
Длина волны в максимуме излучения λ , мкм	1.95	1.95	1.97
Полуширина спектра $\Delta\lambda$ (FWHM), нм	140	155	160
Интегральная средняя оптическая мощность P , мВт	0.96	1.36	2.50
Максимальная спектральная плотность мощности P , мкВт/нм	60	74	139
Внутренний квантовый выход, %	37	52	47

максимальный внутренний квантовый выход в квазистационарном режиме при токе 250 мА — 53%, а в импульсном режиме ($Q = 1000$) при токе 3 А — 77%. Максимальная средняя оптическая мощность тиристор-

ной структуры в квазистационарном режиме составила $P = 2.5$ мВт по сравнению с $P = 0.96$ мВт в диодной структуре, а пиковая мощность в импульсном режиме при длительности импульсов $\tau = 200$ нс — $P = 71$ мВт ($P = 25$ мВт в диодной структуре). Сравнение характеристик исходной диодной структуры, излучающей на длине волны 1.95 мкм, и тиристорной структуры представлено в таблице.

4. Заключение

Представленный в данной работе новый подход к созданию высокоэффективных светодиодов для средней ИК-области спектра (1.6–5.0 мкм) позволил нам решить проблему утечки дырок из активной области, что является одним из основных факторов, снижающих эффективность излучения светодиодов данного спектрального диапазона. Отсутствие материалов, изопериодических с подложкой GaSb, способных обеспечить высокий барьер ΔE_V для дырок, не позволяло решить данную проблему традиционными методами. В тиристорной светодиодной структуре создаются оптимальные условия для интенсивной излучательной рекомбинации. Во включенном состоянии тиристора происходит двухсторонняя инжекция дырок в активной области n -типа. Эффективная рекомбинация происходит в области локализации электронов и дырок вблизи гетерограницы $p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}$. Тиристорные структуры обладают высокой стабильностью работы при больших токах, что важно для использования в электронной технике. Сочетание указанных факторов приводит к увеличению предельно достижимой оптической мощности более чем в 2.5 раза по сравнению с традиционными диодными структурами. В данной работе были реализованы светодиоды с максимумом излучения в районе 1.95 мкм, однако применение тиристорных гетероструктур перспективно для увеличения квантового выхода и других светодиодных структур для спектрального диапазона 1.6–2.4 мкм. На основе предлагаемой модели тиристорной структуры могут быть также созданы лазеры-тиристоры для средней ИК-области спектра 2–3 мкм.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 04-02-13655, 06-08-01364-а, а также грантами ОФН и ведущей научной школы НШ-5180.2006.2.

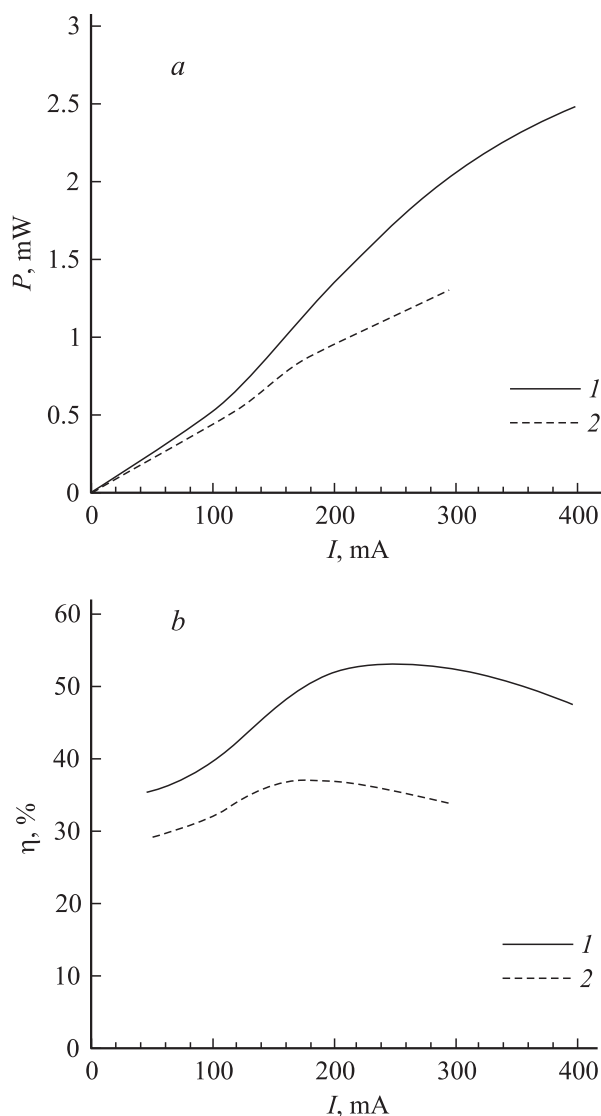


Рис. 5. Зависимости от тока: *a* — мощности и *b* — внутреннего квантового выхода для двух светодиодных структур, излучающих на длине волны 1.95 мкм: 1 — тиристорная структура, 2 — диодная структура.

Список литературы

- [1] А.А. Андаспаева, А.Н. Баранов, А.А. Гусейнов, А.Н. Именков, Н.М. Колчанова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **24** (10), 1708 (1990).
- [2] Н.Д. Стоянов, Б.Е. Журтанов, А.П. Астахова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **37**, 996 (2003).
- [3] T. Hasenberg, R.H. Miles, A.R. Host, L. West. IEEE J. Quant. Electron., **33**, 1403 (1997).
- [4] А.Н. Баранов, Б.Е. Журтанов, А.Н. Именков, А.А. Рогачев, Ю.М. Шерняков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **20**, 2217 (1986).
- [5] И.А. Андреев, Е.В. Куницына, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. ФТП, **33** (2), 249 (1999).
- [6] Н.Д. Стоянов, М.П. Михайлова, О.В. Андрейчук, К.Д. Моисеев, И.А. Андреев, М.А. Афраилов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **35** (4), 467 (2001).
- [7] Ж.И. Алфёров, Г.Д. Андреев, В.И. Корольков, В.Т. Никитин, В.Б. Смирнов, А.А. Яковенко. ФТП, **7** (5), 914 (1973).
- [8] Ж.И. Алфёров. В сб. : *Физика и жизнь* (М.–СПб., Наука, 2001) с. 121.
- [9] M. Feng, N. Holonyak, Jr., B. Chu-Kung, G. Walter, R. Chan. Appl. Phys. Lett., **84**, 4792 (2004).
- [10] G. Walter, N. Holonyak, M. Feng, R. Chan. Appl. Phys. Lett., **85**, 4768 (2004).
- [11] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев ФТП, **25** (2), 276 (1991).
- [12] Т.И. Воронина, Б.Е. Журтанов, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. ФТП, **32** (3), 278 (1998).

Редактор Л.В. Беляков

High Effective LED Based on Type II Heterostructures $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/P\text{-AlGaAsSb}$

N.D. Stoyanov, B.E. Zhurtanov, A.N. Imenkov, A.P. Astakhova, M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The new type a high effective LED with a peak wavelength $\lambda = 1.95\mu\text{m}$ is proposed on the basis of thyristor heterostructure $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/P\text{-AlGaAsSb}$. Its electric and luminescent characteristics are investigated. It is shown that in thyristor structure effective radiating recombination occurs in the GaInAsSb active layer of n -type due to bilateral injection of holes from the adjacent p -areas. In the investigated structure, the maximal internal quantum yield in a pulse mode of 77% was obtained. Average optical power achieved 2.5 mW, and peak power in a pulse mode 71 mW, which exceed in 2.9 times the optical power received for a standard $n\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/P\text{-AlGaAsSb}$ LED, emitting in the same spectral range. The approach suggested will allow to improve parameters of the light-emitting diodes in other middle infrared spectral range (2–5 μm).