

06.3;07;12

1.94 μm светодиоды для влагометрии

© А.А. Попов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 6 марта 1997 г.

Продемонстрированы мощные светодиоды с квантовым выходом в 5.5% на основе двойной симметричной гетероструктуры GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, с максимумом спонтанного излучения на длину волны 1.94 μm , работающие в области температур $-80 - +60^\circ\text{C}$. Достигнута непрерывная оптическая мощность — 3.7 mW (CW) и пиковая оптическая мощность — 90 mW ($\tau \sim 1-5$ ns, $f = 1$ kHz) при комнатной температуре. Приведены основные электрические и излучательные характеристики.

Область длин волн 1.8–2.0 μm весьма привлекательна для целей влагометрии (детектирования содержания влаги в различных веществах) [1]. Устройства с использованием спектральных методов детектирования, излучающие в данной области, являются перспективными для создания портативных анализаторов и мобильных экспресс-приборов технологического контроля [2,3]. В частности, могут быть созданы приборы для детектирования содержания влаги в прозрачных и не прозрачных материалах, таких как бумага, древесина и древесных опилках, различных листовых материалах и пищевых продуктах. Источниками излучения в них могут быть полупроводниковые излучатели (светодиоды), спектральная плотность мощности и эффективность которых превосходит аналогичные показатели тепловых источников излучения. Применение полупроводниковых светодиодов с узкой по сравнению с тепловыми источниками линией излучения и возможностью прямой электрической модуляции позволяет создать компактные анализаторы, отличающиеся отсутствием дополнительных оптических фильтров и механических модуляторов. Для спектральной области 1.8–2.0 μm такие светодиоды создаются из гетероструктур на основе напряженных слоев соединений InGaAs/GaAs [4], InGaAsP/InP, а также твердых растворов GaInAsSb/GaSb [5,6]. Последние являются наиболее привлекательным материалом, поскольку основаны на использовании строго изопериод-

ных гетероструктур с низкой плотностью дислокаций несоответствия и отличаются повышенной устойчивостью к деградации.

Цель настоящей работы — сообщить о создании мощных светодиодов с максимум спонтанного излучения на длине волны $1.94 \mu\text{m}$. Данные светоизлучающие диоды, работающие при комнатной температуре и выше, были тестированы нами как в непрерывном (CW), так и в импульсном режиме (PW). В силу особой перспективности мощных светодиодов для практического использования основное внимание будет уделено характеристикам светодиодов при импульсном режиме питания, позволяющем достичь высокой пиковой мощности в среднем инфракрасном диапазоне при комнатной температуре.

Светоизлучающие диоды представляют собой двойную симметричную гетероструктуру GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, выращенную методом жидкофазной эпитаксией на подложке $n\text{-GaSb}(100)$. Структура состояла из четырех эпитаксиальных слоев, причем активный слой $n\text{-GaInAsSb}$ (толщиной — $0.7 \mu\text{m}$) был заключен между двумя широкозонными эмиттерами $N\text{-}$ и $P\text{-GaAlAsSb}$. Все слои были согласованы по периоду решетки с подложкой GaSb. Активный слой GaInAsSb характеризовался содержанием индия 0.08 ($E_g = 0.64 \text{ eV}$) и был легирован Te до концентрации $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Широкозонные ограничивающие слои GaAlAsSb выращивались с содержанием Al — 0.50 ($E_g = 1.11 \text{ eV}$) и легировались Te и Ge до концентрации $(2-4) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и $(6-8) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ для слоев $N\text{-}$ и $P\text{-}$ типа соответственно.

Исследовались круглые мезадиоды, полученные с помощью фотолитографии и глубокого химического травления в подложку. Полный размер кристалла одиночного светодиода составлял $500 \cdot 500 \mu\text{m}$. Диаметр мезы ($300 \mu\text{m}$) определял площадь с излучающей поверхности ($S = 7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$). Полупроводниковый кристалл монтировался на стандартный корпус ТО-18. На корпус ТО-18 монтировался параболический отражатель таким образом, чтобы излучающий кристалл юстировался в фокус параболы, что позволило сколлимировать излучение светодиода в угле $(10-12)$ градусов. Полные размеры светодиода с параболическим отражателем составляли 9 mm в диаметре и 5.5 mm в длину.

Электрические и спектральные характеристики диодов были исследованы с помощью установки, созданной на основе стандартной схемы синхронного детектирования, монохроматора МДР-2 и фотодиода на основе GaInAsSb. Оптическая мощность регистрировалась прибором ИМО-2М.

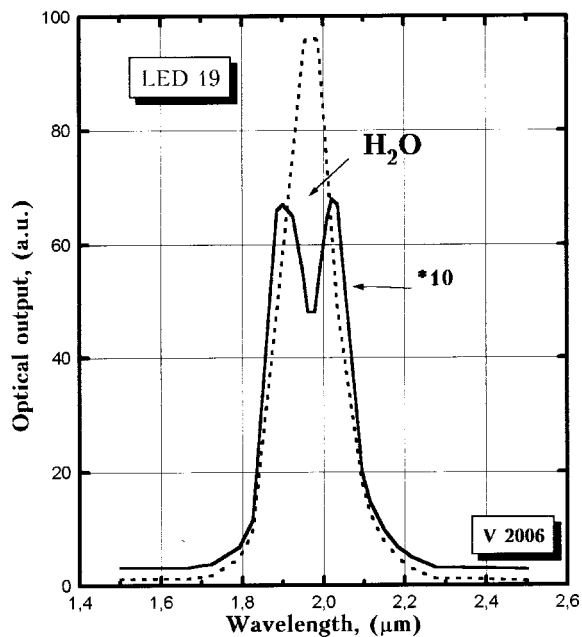


Рис. 1. Спектр поглощения излучения светодиода слоем воды толщиной $5 \mu\text{m}$ и спектр светодиода в непрерывном режиме (штриховая линия) при комнатной температуре. Для обоих спектров полуширина FWHM излучения $0.12 \mu\text{m}$, полоса поглощения воды $0.03 \mu\text{m}$. Ток инжекции 50 mA (CW).

Вольт-амперные характеристики светодиодов имеют диодный характер с напряжением отсечки 0.50 V при комнатной температуре ($T = 300 \text{ K}$) и 0.75 V при азотной температуре ($T = 77 \text{ K}$). Обратный ток утечки был 0.8 mA при напряжении 1 V . Обратное напряжение пробоя оказалось чувствительно к температуре и возрастало с 1.3 V при комнатной до 1.9 V при азотной температуре. Последовательное сопротивление при прямом смещении не превышало $\sim 2.4 \Omega$.

Спектральные и мощностные характеристики диодов тестировались при накачке как в непрерывном (CW), так и в импульсном (PW) режиме. Спектральные характеристики светодиода при комнатной температуре представлены на рис. 1. При комнатной температуре спектр содержит

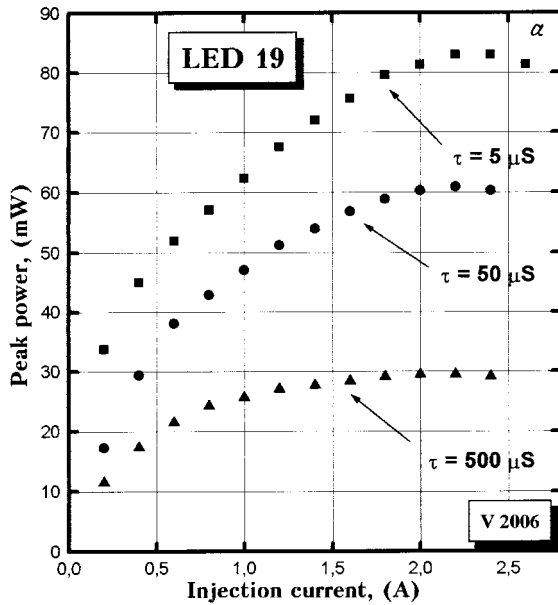


Рис. 2. Мощностные характеристики светодиода при комнатной температуре: *a* — зависимость пиковой мощности от частоты повторения при фиксированной длительности импульсов ($\tau = 1 \mu\text{s}$); *b* — зависимость пиковой мощности от длительности импульса при фиксированной частоте повторения импульсов ($f = 1 \text{ kHz}$). Кривая, соответствующая длительности импульса 500 ns и частоте повторения 1 kHz, отвечает наибольшей скважности. Наивысшая пиковая мощность достигается при скважности $\sim 10^{-3}$.

одну полосу излучения ($\lambda = 1.94 \mu\text{m}$, $T = 300 \text{ K}$), положение которой соответствовало энергии ширины запрещенной зоны активной области ($E_g = 0.64 \text{ eV}$). Максимум спектра излучения слабо зависел от величины инжектированного тока. Сдвиг максимума излучения в длинноволновую сторону может быть грубо описан скоростью 0.05 nm/mA . Ширина спектра излучения на полувысоте (FWHM) составляла $0.12 \mu\text{m}$. Ширина спектра слегка увеличивалась с током накачки (от $0.12 \mu\text{m}$ при 30 mA до $0.14 \mu\text{m}$ при 150 mA). Коэффициент внешней квантовой эффективности излучения составлял 5.5%.

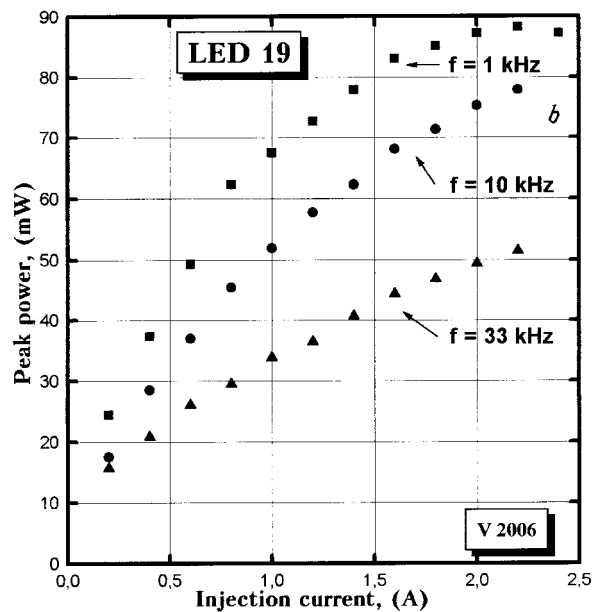


Рис. 2 (продолжение).

Время жизни неосновных носителей заряда оценивалось по времени нарастания и спада излучения при переключении тока накачки. При комнатной температуре оно составляло порядка $\sim 20\text{--}25$ ns. Отметим, что оно является достаточным для большинства приложений, поскольку допускает модуляцию на частотах, превышающих тепловые шумы ($5\text{--}10$ MHz). В целом спектральные и электрические характеристики соответствовали рекомбинации в объеме активной области.

При охлаждении до температуры жидкого азота положение максимума спектра излучения смещалось на $0.19 \mu\text{m}$ в коротковолновую сторону в хорошем согласии с температурной зависимостью энергии запрещенной зоны активной области. С понижением температуры время жизни сначала незначительно увеличивалось, а затем вновь уменьшалось.

В непрерывном режиме выходная оптическая мощность светодиода возрастала в области токов накачки до 150 mA. Максимальная непрерывная мощность 3.7 mW была достигнута при инжекционном

токе 150 мА. При больших величинах непрерывного тока происходило насыщение ватт-амперной характеристики, что являлось следствием токового разогрева активной области. Исследования, выполненные нами ранее [7] в области $2.3 \mu\text{m}$, показали наличие разогрева для токов, превышающих 50 мА. В более коротковолновых светодиодах разогрев также играет важную роль, но начинает сказываться при более высоких токах накачки. Ватт-амперные характеристики (ВтАХ) были исследованы в зависимости от температуры в области от -80 до $+60^\circ\text{C}$. Анализ ВтАХ в этой области температур показал экспоненциальную температурную зависимость выходной оптической мощности. С понижением температуры выходная мощность возрастала, с характеристической температурой 80 К, а положение максимума излучения при этом смещалось в область коротких волн со средней скоростью порядка 0.28 nm/K . Необходимо отметить, что в целом диапазоне температур от комнатной до азотной пик излучения смещался в голубую сторону на $0.19 \mu\text{m}$, что соответствует температурной зависимости энергии запрещенной зоны GaInAsSb.

С целью уменьшения влияния разогрева при токах, превышающих 150 мА, исследования были выполнены при импульсном режиме накачки. Для исследования режимов накачки, при которых достигается максимальная импульсная мощность излучения, измерения были выполнены в зависимости как от частоты повторения, так и от длительности импульса. На рис. 2, *a* представлена зависимость пиковой мощности от тока при фиксированной частоте повторения и различных длительностях импульса тока. Измерения показали, что насыщение ватт-амперных характеристик GaInAsSb светодиодов при больших уровнях накачки происходит при длительностях токового импульса более $50\text{--}100 \mu\text{s}$. Для более коротких импульсов выходная мощность диода нарастает с током до 2 А. В этой области токов наклон ВтАХ начинает изменяться при любых длительностях импульса и зависит от амплитуды тока. С целью достижения максимальной пиковой мощности была исследована зависимость выходной мощности от частоты повторения при фиксированной длительности импульса $1 \mu\text{s}$. Результаты исследований представлены на рис. 2, *b*. Исследования показали, что насыщение начинается с частот порядка $20\text{--}30 \text{ kHz}$. Достигнутая максимальная оптическая мощность составляла $90 \text{ mW @ } 2 \text{ A, } 1 \mu\text{s, } 1 \text{ kHz}$. Приведенные мощностные характеристики показывают сильную зависимость выходной оптической мощности светодиодов на основе узкозонных соединений от скважности инжектируемого тока и параметров импульса накачки. Заметим, что

полупроводниковая гетероструктура GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb характеризуется наличием больших разрывов зон проводимости, величина которых сравнима с шириной запрещенной зоны активной области. Потому, как было показано ранее [7], параметры инжекционного тока в таких гетероструктурах должны сильно влиять на величину токового разогрева активной области. Реальная температура активной области будет являться определяющим фактором, ускоряющим процессы безызлучательной рекомбинации в светодиодах на их основе и ограничивать достигаемую мощность.

Таким образом, нами созданы светодиоды с квантовым выходом в 5.5%, на длину волны излучения 1.94 μm и шириной спектра (FWHM) 0.12 μm для целей влагометрии. В диодах на основе двойной гетероструктуры GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb была достигнута непрерывная оптическая мощность 3.7 mW. При комнатной температуре показано, что максимальная пиковая оптическая мощность 90 mW может быть достигнута при накачке импульсами длительностью $\sim 1-5$ ms и частотой повторения 1 kHz. Приведены основные электрические и излучательные характеристики и оптимизированы с точки зрения спектральных приложений.

Список литературы

- [1] Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Chris Benner D., Malathy Devi V., Flaud J.-M., Camy-Peyret C., Goldman A., Massie S.T., Brown L.R., Toth R.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1992. V. 48. P. 469–507.
- [2] Baranov A.N., Yakovlev Yu.P., Imenkov A.N., Mikhailova M.P., Klementenok A.L., Shutov V. // Paper Industry. 1989. V. 8. P. 20–23.
- [3] Cravder J.P., Smith S.D., Ashley T., Phillips C.C. // Abstracts of Intern. Conf. Mid-infrared optoelectronics. Materials and devices. Lancaster, UK, 1996. Sept. 17–18.
- [4] Murti M.R., Grietens B., Van Hoof C., Borghs G.J. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. N 1. P. 578–580.
- [5] Andaspaeva A.A., Baranov A.N., Guseinov A.A., Imenkov A.N., Kolchanova N.M., Sidorenkova E.A., Yakovlev Yu.P. // Sov. Tech. Phys. Lett. 1989. V. 5. N 1. P. 734–737.
- [6] Popov A., Sherstnev V., Yakovlev Yu., Baranov A., Alibert C. // Electron. Lett. 1997. V. 30. N 1. P. 86–88.
- [7] Kolchanova N.M., Popov A.A., Sukach G.A., Bogoslovskaya A.B. // Semiconductors. 1994. V. 28. N 12. P. 1137–1140.