

06:07:12

Светодиоды на основе InAsSb для детектирования CO₂ ($\lambda = 4.3 \mu\text{m}$)

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

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

Поступило в Редакцию 15 января 1998 г.

Сообщаются основные характеристики светодиодов ($\lambda = 4.3 \mu\text{m}$), созданные на основе A^3B^5 полупроводниковых гетероструктур InAsSbP/InAsSb/InAsSbP с варизонным буферным слоем InAsSb, работающие при комнатной температуре. Достигнута оптическая мощность светодиодов $P = 0.85 \text{ mW}$ (длительность импульса $\sim 5 \mu\text{s}$, частота следования 1 kHz). Показаны условия получения максимальной мощности для светодиодов. Продемонстрирован пример использования исследованных светодиодов для детектирования углекислого газа на основной полосе поглощения $4.3 \mu\text{m}$.

Для целей экспресс-анализа содержания CO, CO₂ [1] как в производственных, так и в бытовых условиях привлекательными являются газоанализаторы, основанные на спектральных методах детектирования в области длин волн $4.0\text{--}4.8 \mu\text{m}$. Они могут быть созданы с использованием полупроводниковых светодиодов на основе соединений InAsSb как источников излучения [2]. Однако создание светодиодных структур эпитаксиальными методами на подложке InAs с длиной волны излучения свыше $3.8 \mu\text{m}$ встречает определенные трудности [3–4]. Это связано с тем, что эпитаксия не позволяет получать слои, рассогласованные по параметру решетки $\Delta a/a$ более чем 0.5%, тогда как получение слоев InAsSb с шириной запрещенной зоны, соответствующей длинам волн излучения светодиода более $3.8 \mu\text{m}$, требует больших рассогласований решеток полупроводников. Хотя для спектральной области $4 \mu\text{m}$ светодиоды могут быть созданы на основе полупроводников CdHgTe [5], гетероструктуры с использованием антимонидных соединений A^3B^5 являются наиболее привлекательным материалом, поскольку отличаются лучшей теплопроводностью. Ранее такие светодиоды создавались различными методами. Один из подходов был продемонстрирован в работе [2], где светодиоды спектрального диапазона $4.2 \mu\text{m}$ были созданы на основе эпитаксиальных слоев InAsSb, выращенных на под-

ложке GaSb. Другим способом стало выращивание гетероструктуры InAsSbP/InAsSb/InAsSbP с варизонным эмиттерным слоем InAsSbP на подложке [4].

Настоящая работа является продолжением наших предыдущих исследований в области длинноволновых светоизлучающих структур на основе InAs [5]. Ее цель — сообщить об основных характеристиках InAsSbP/InAsSb/InAsSbP светодиодов, созданных с использованием варизонного буферного слоя InAsSb и излучающих в области длин волн $4.3 \mu\text{m}$ при комнатной температуре. Будет показано, что оптимизация режима питания светодиодов позволяет более чем на порядок увеличить их оптическую мощность, а также приведен пример практического использования светодиода для детектирования CO_2 в спектральной области $4.3 \mu\text{m}$.

Исследуемые светодиоды представляли собой двойную гетероструктуру InAsSbP/InAsSb/InAsSbP (рис. 1, А), выращенную методом жидкофазной эпитаксии на подложке InAs (100) с варизонным (5–8%) буферным слоем InAsSb. Технология эпитаксии сообщалась нами ранее [7]. Промежуточный слой был толщиной $4 \mu\text{m}$ и легировался до уровня подложки. Активная область InAsSb, была толщиной $2 \mu\text{m}$, специально не легировалась и имела естественную концентрацию примеси. Широкозонные ограничивающие слои InAsSbP выращивались с содержанием фосфора 18–20% и легировались Sn и Zn до концентрации $(5 - 7) \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ и $(1 - 2) \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ для слоев *N*- и *P*-типа соответственно. Содержание сурьмы в промежуточном слое и активной области было 6–8% и 12–13% соответственно. При этом рассогласование промежуточного слоя относительно подложки InAs составляло около 0.5%, а для активной области — 0.9%.

Методом стандартной фотолитографии и глубокого химического травления на эпитаксиальной структуре формировалась квадратная меза с размерами $500 \times 500 \mu\text{m}$ (площадь $S = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{cm}^2$). Кристалл светодиода паялся индием на стандартный корпус ТО-18. Параболический отражатель, смонтированный на корпусе, служил для сужения пространственной диаграммы направленности излучения до 10–12 grad. Полные размеры светодиода с отражателем составляли 9 mm в диаметре и 5.5 mm в длину.

Спектральные характеристики светодиодов исследовались на установке, созданной по схеме синхронного детектирования с использованием монохроматора МДР-12 и охлаждаемого светодиода на основе InSb с полосой пропускания до 10 MHz. Оптическая мощность

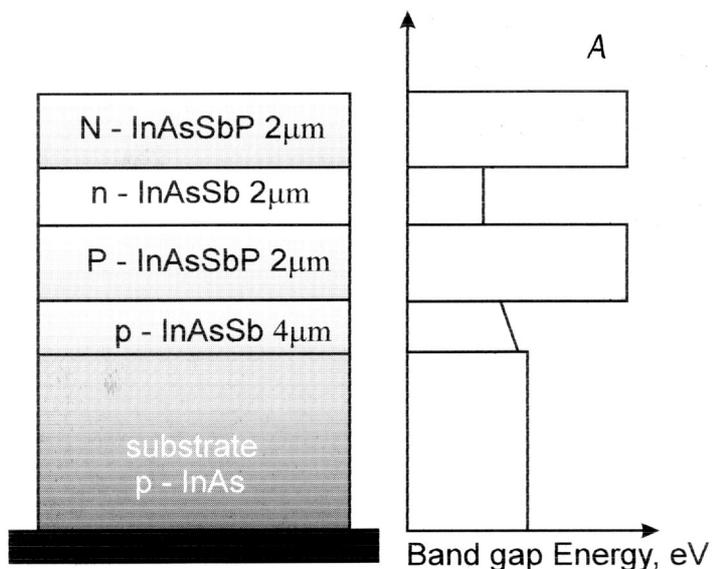


Рис. 1. *A* — схема исследованной двойной гетероструктуры, созданной на подложке InAs с использованием буферного варизонного слоя InAsSb. В правой части рисунка приведена ее плоская энергетическая зонная диаграмма. *B* — спектр поглощения излучения светодиода углекислым газом при атмосферном давлении, записанный при импульсном режиме питания и комнатной температуре. Ширина FWHM спектра излучения — $0.8 \mu\text{m}$. Ток инжекции 0.5 A .

регистрировалась прибором ИМО-2М. Все измерения были сделаны при комнатной температуре ($T = 300 \text{ K}$). Постоянный ток питания светодиода был ограничен величиной 200 mA . Импульсы амплитудой до 1.2 A и длительностью $5\text{--}50 \mu\text{S}$ использовались для питания светодиодов в области больших значений тока.

Спектр излучения светодиода содержал одну полосу излучения с максимумом $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$ при комнатной температуре. Ширина спектра излучения на полувысоте (FWHM) составляла $\sim 0.8 \mu\text{m}$. Хотелось бы отметить, что данное значение соответствует $\sim 2.5\text{--}3 \text{ kT}$ и является типичным для электролюминесценции соединений InAs. Положение максимума спектра излучения светодиода не зависело от величины инжекционного тока. В целом спектральные и электрические характери-

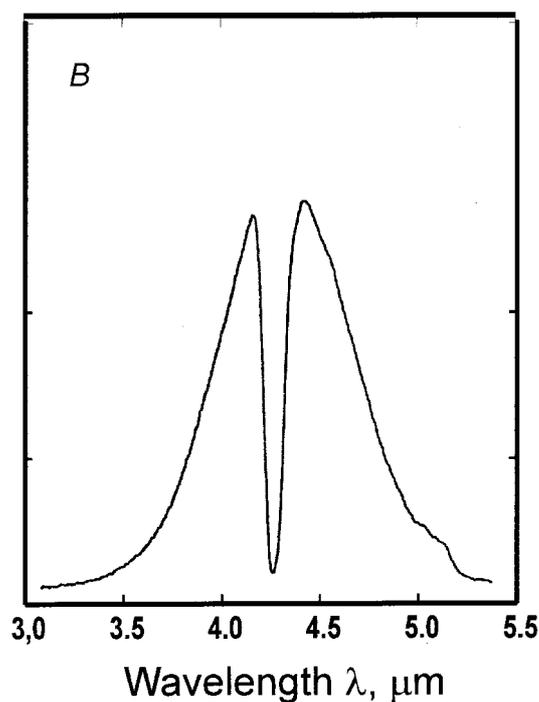


Рис. 1 (продолжение).

стики соответствовали квазимезонной рекомбинации в объеме активной области, что согласуется с выводами предшествующих работ [3,4]. На рис. 1, B показан спектр светодиода при прохождении излучения через негерметичный монохроматор. При этом на спектре наблюдается провал, соответствующий интегральному спектру поглощения группы близлежащих линий поглощения газа CO_2 ($\lambda \sim 4.23\text{--}4.29 \mu\text{m}$). Спектр поглощения соответствует содержанию углекислого газа в воздухе при атмосферном давлении и базе монохроматора 2 м. Наличие достаточно интенсивных близлежащих линий поглощения, перекрываемых шириной спектра светодиода, позволяет поднять чувствительность детектирования за счет сбора суммарного сигнала.

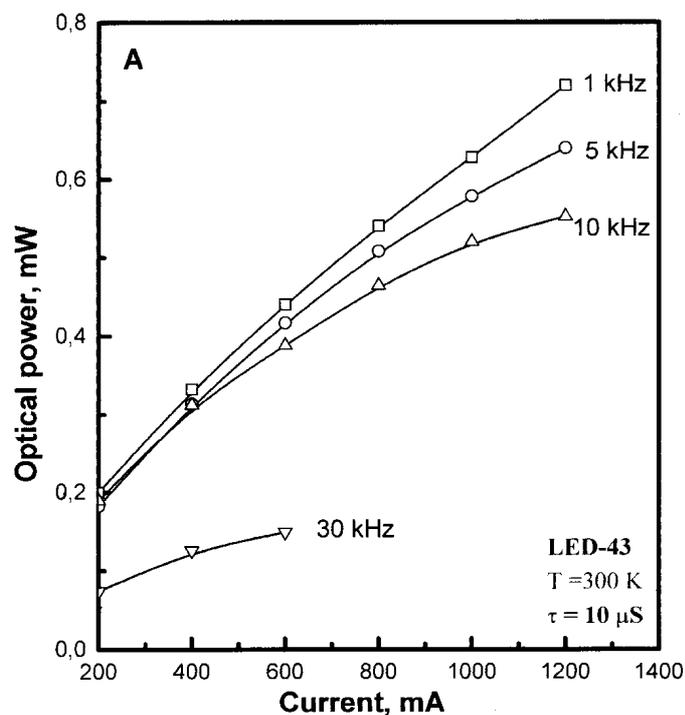


Рис. 2. Зависимость пиковой мощности светодиода при комнатной температуре от частоты повторения при фиксированной длительности импульса $\tau = 10 \mu\text{s}$ (A) и длительности импульса при фиксированной частоте повторения импульсов $f = 1 \text{ kHz}$ (B). Наивысшая пиковая мощность достигается при длительности импульса не более $5 \mu\text{s}$.

В квазинепрерывном режиме зависимость выходной оптической мощности светодиода от тока отклонялась от линейной зависимости (при $I \geq 100 \text{ mA}$) и стремилась к насыщению при токах $\sim 200 \text{ mA}$ ($P \sim 20 \mu\text{W}$). Это определялось, скорее всего, сильным влиянием джоулева разогрева на процессы безызлучательной рекомбинации в узкозонных полупроводниках. Поэтому наиболее интересными представлялись измерения, выполненные в импульсном режиме питания с малой скважностью.

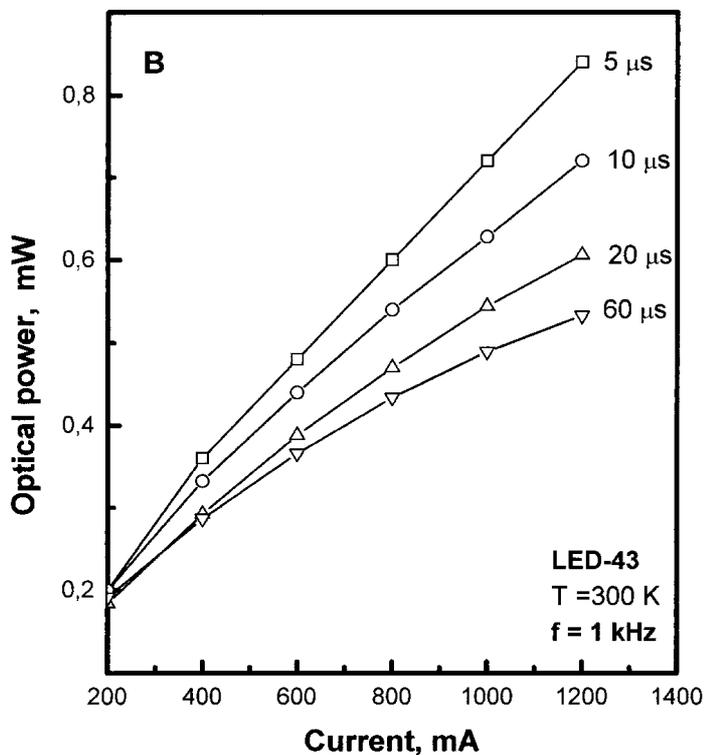


Рис. 2 (продолжение).

При токах, превышающих 200 мА, были выполнены подробные исследования с использованием импульсного режима накачки. максимальная частота модуляции определялась быстродействием созданных светодиодов, которое оценивалось по суммарному времени нарастания и спада излучения при переключении тока накачки. При комнатной температуре оно составляло порядка $\sim 50\text{--}100$ ns. Поэтому при наших измерениях частота модуляции была ограничена диапазоном частот ниже 10 МГц. Однако данная частотная полоса привлекательна для большинства приложений, поскольку допускает модуляцию на частотах, соответствующих полосе пропускания типичных фотодетекторов среднего инфракрасного диапазона.

Для исследования токовых режимов, при которых достигается максимальная импульсная мощность излучения, были выполнены измерения в зависимости как от частоты повторения, так и от длительности импульса.

На рис. 2, *A* представлена зависимость выходной мощности светодиода от тока при различных частотах повторения импульсов ($f = 1\text{--}30\text{ kHz}$) при фиксированной длительности импульса тока ($\tau = 10\ \mu\text{s}$). При частоте повторения 1 kHz выходная мощность практически линейно зависит от тока до $I = 1200\text{ mA}$. С ростом частоты повторения импульсов зависимость оптической мощности излучения от тока заметно отклоняется от линейной зависимости при $f \geq 10\text{ kHz}$, а при частоте повторения $f = 30\text{ kHz}$ насыщение наступает уже при токе 600 mA (рис. 2, *A*).

На рис. 2, *B* показана зависимость выходной мощности от тока при различных длительностях импульса тока ($\tau = 5\text{--}60\ \mu\text{s}$) при фиксированной частоте повторения ($f = 1\text{ kHz}$). Если при длительностях менее $10\ \mu\text{s}$ зависимость фактически линейна до токов 1200 mA , то при больших длительностях импульса ($\tau \geq 20\ \mu\text{s}$) скорость нарастания выходной мощности с током уменьшается, а ее абсолютное значение тем меньше, чем больше длительность импульса.

Достигнутая максимальная оптическая мощность составляла 0.8 mW при $I = 1.2\text{ A}$, $\tau = 5\ \mu\text{s}$, $f = 1\text{ kHz}$. Хотелось бы отметить, что данное значение превышает значение выходной оптической мощности светодиодов $\text{HgCdTe} \sim 0.048\text{ mW}$, большие токи накачки которых были невозможны из-за высокого последовательного сопротивления ($R \sim 80\ \Omega$) [6]. Достигнутое в настоящей работе значение мощности превышает также значение мощности светодиодов, доложенное в работе [4].

Таким образом, в настоящей работе приведены основные характеристики светодиодов, созданных на основе полупроводниковых гетероструктур $\text{InAsSbP}/\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ с максимумом излучения на длине волны $4.3\ \mu\text{m}$. Исследованные светодиоды были созданы с использованием варизонного буферного слоя InAsSb , что позволило получить светодиоды с максимумом длины волны излучения $4.3\ \mu\text{m}$ на подложке InAs . Показано, что оптимизация режима питания светодиодов позволяет более чем на порядок увеличить их оптическую мощность. Поскольку источники излучения в спектральном диапазоне $\sim 4.3\ \mu\text{m}$ перспективны, в частности для целей газового анализа, то приведен пример регистрации спектра поглощения углекислого газа с использованием исследованных диодов.

Настоящая работа была поддержана ЕС в рамках программы INCO-Copernicus.

Список литературы

- [1] Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H., Rinsland C.P., Smith M.A., Chris D., Benner V., Malathy D., Flaud J.-M., Camy C.-Peyret, Goldman A., Massie S.T., Brown L.R., Toth R.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1992. V. 48. P. 469–507.
- [2] Mao, Krier A. // Optical Materials. 1996. V. 6 (1-2). P. 55–61.
- [3] Айдаралиев М., Зотова Н.В., Матвеев Б.А., Стусь Н.Н., Талалакин Г.Н. // Письма в ЖТФ. 1983. V. 9 (7). P. 391–395.
- [4] Баранов А.Н., Именков А.Н., Капранчик О.П., Негрескул В.В., Чернявский А.Г., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16 (16). С. 42–47.
- [5] Попов А.А., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23 (21). С. 24–31.
- [6] Hadji E., Bleuse J., Magnea N., Pautrat J.L. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67 (18). P. 2591–2593.
- [7] Литвак А.М., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ЖПХ. 1994. Т. (12). С. 1957–1960.