

06;07;12

### 3.3 $\mu\text{m}$ светодиоды для измерения метана

© 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 мая 1997 г.

Созданы светодиоды, излучающие в области фундаментальной полосы поглощения метана на длине волны  $3.3 \mu\text{m}$  для быстродействующих газоанализаторов. Достигнута непрерывная оптическая мощность —  $0.13 \text{ mW}$  (CW) и пиковая оптическая мощность —  $2.2 \text{ mW}$  (длительность импульса —  $50 \mu\text{s}$ , скважность —  $1.6 \cdot 10^2$ ). Исследована токовая зависимость оптической мощности от параметров импульса тока накачки и показаны условия, позволяющие достичь максимальную пиковую мощность излучения светодиодов среднего инфракрасного диапазона.

Спектральная область  $3.3 \mu\text{m}$  весьма привлекательна для целей детектирования углеводородов в различных средах, поскольку содержит фундаментальную линию поглощения углеводородов C–H [1]. Поэтому устройства, основанные на абсорбционных спектральных методах детектирования с излучателями в данной области волн, являются перспективными для портативных газоанализаторов и приборов аварийного оповещения предельно допустимой концентрации метана, этана, пропана и других газов как в производственных (шахты, газопроводы), так и в бытовых условиях [2]. Источниками излучения в них могут быть полупроводниковые светодиоды, спектральная плотность мощности, эффективность и быстродействие которых существенно превосходят аналогичные показатели тепловых источников излучения. Для спектральной области  $3 \mu\text{m}$  такие диоды могут быть созданы из гетероструктур на основе полупроводников CdHgTe [3], напряженных слоев соединений InGaAs/InP [4] или твердых растворов InAsSb/InAs [5–9]. Последние являются наиболее привлекательным материалом, поскольку основаны на использовании  $A^3B^5$  полупроводниковых гетероструктур, отличающиеся устойчивостью к деградации и лучшей теплопроводностью.

Цель настоящей работы — сообщить о создании светодиодов на основе двойной гетероструктуры InAs/InAsSbP с максимумом спонтанного излучения на длине волны  $3.3 \mu\text{m}$  при комнатной темпера-

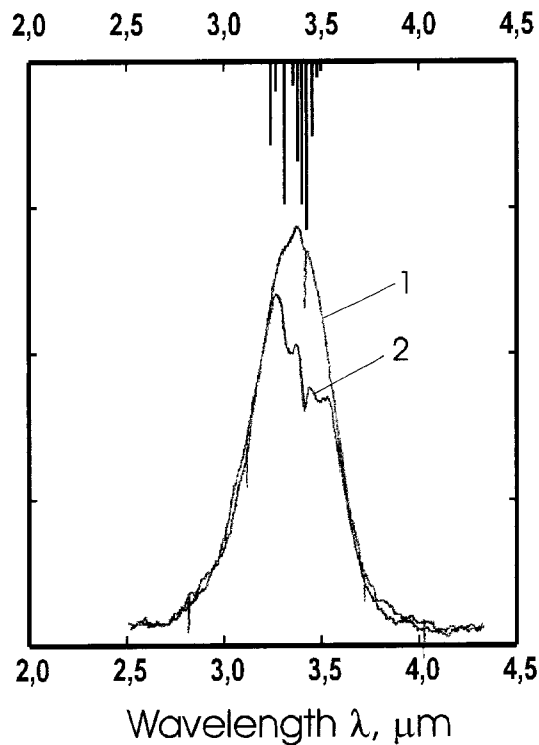
туре и привести результаты исследования характеристик, наиболее существенных для их практического использования. Будет показано, что оптимизация параметров импульса питания светодиодов на основе узкозонных полупроводников позволяет более чем на порядок увеличить их максимальную оптическую мощность.

Светоизлучающие диоды представляли собой двойную симметричную гетероструктуру InAs/InAsSbP, выращенную методом жидкофазной эпитаксии на подложке InAs (100) по технологии, которая сообщалась ранее в [10]. Структура состояла из трех эпитаксиальных слоев: активный слой InAs (толщиной — 1.0 мкм) был заключен между двумя широкозонными эмиттерами *N*- и *P*-InAsSbP. Активный слой InAs специально не легировался. Широкозонные ограничивающие слои InAsSbP выращивались с содержанием фосфора — 0.35 ( $E_g = 550 \mu\text{eV}$ ) и легировались Sn и Zn до концентрации  $(5-7) \cdot 10^{18}$  и  $(1-2) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  для слоев *N*- и *P*-типа соответственно.

Предметом исследования были круглые меза-диоды, полученные с помощью фотолитографии и глубокого химического травления в подложку. Площадь излучающей поверхности ( $S = 7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ ) определялась диаметром мезы (300  $\mu\text{m}$ ). Полный размер кристалла одиночного светодиода составлял  $500 \times 500 \mu\text{m}$ . Полупроводниковый кристалл паялся индием на стандартный корпус ТО-18. Параболический отражатель, смонтированный на корпусе, служил для сужения пространственной диаграммы направленности излучения светодиода до 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 измерялись с помощью установки, созданной на основе стандартной схемы синхронного детектирования, монохроматора МДР-12 и охлаждаемого фотодиода на основе InSb с полосой пропускания до 10 MHz. Оптическая мощность регистрировалась прибором ИМО-2М. Измерения были выполнены при комнатной температуре ( $T = 296 \text{ K}$ ).

Диоды запитывались в непрерывном режиме током до 150 mA DC, в импульсном режиме при скважности до  $10^3$  — не более 2 A. Вольт-амперные характеристики светодиодов имели диодный характер с напряжением отсечки  $\sim 0.12 \text{ V}$  при комнатной ( $\sim 0.36 \text{ V}$  при азотной) температуре. Если вольт-амперную характеристику описать зависимостью  $I = I_0 \exp(qU/kT)$ , где  $q$  — заряд электрона,  $U$  — напряжение,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура, то ток



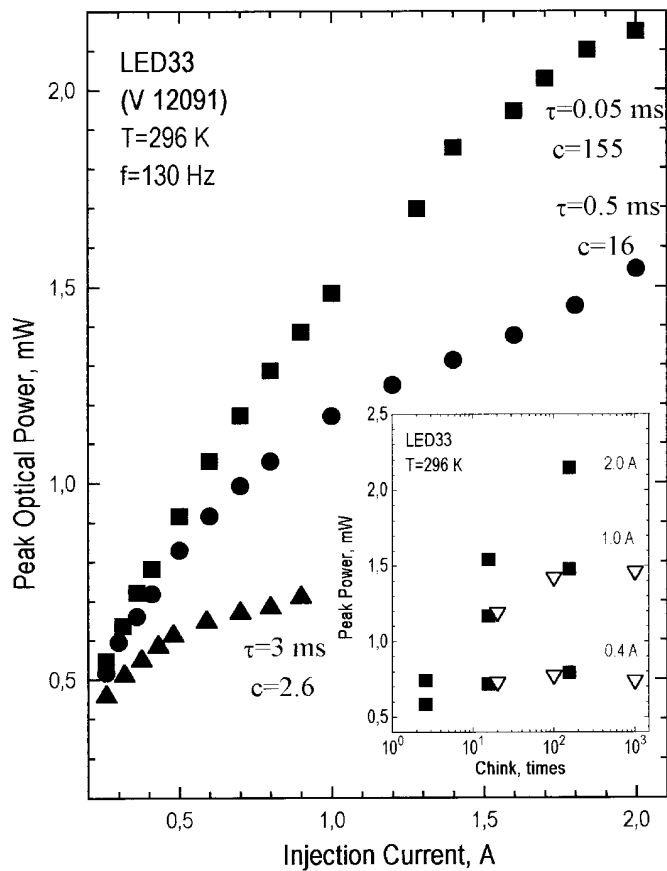
**Рис. 1.** Спектр излучения светодиода (кривая 1), записанный при непрерывном режиме питания и комнатной температуре. Ширина FWHM спектра излучения  $0.5 \mu\text{m}$ . Ток инжекции  $120 \text{ mA DC}$ . Спектр поглощения излучения светодиода метаном при атмосферном давлении, записанный при тех же условиях, представлен кривой 2. Длина кюветы составляла  $2.5 \text{ cm}$ . Для сравнения положение и относительная интенсивность линий поглощения метана, построенные на основании базы данных HITRAN92 [1], приведены в верхней части рисунка.

насыщения  $I_0$  составлял  $\sim 4.6 \text{ mA}$ . Последовательное сопротивление при прямом смещении составляло  $\sim 0.6 \Omega$ .

Спектр излучения светодиода в режиме непрерывного питания ( $I = 120 \text{ mA}$ ) при комнатной температуре представлен на рис. 1. Спектр содержит одну полосу излучения с максимумом на длине волны

$\lambda = 3.3 \mu\text{m}$ . Ширина спектра излучения светодиода на полувысоте (FWHM) составляла  $\sim 0.5 \mu\text{m}$ . Хотелось бы отметить, что данное значение в  $\sim 2.5\text{--}3$  раза превышает  $kT$  и является типичным для электролюминесценции соединений InAs. Это, вероятно, может быть связано как с наличием хвостов плотности состояний в зоне проводимости, так и с возможностью излучательной рекомбинации в области гетерограниц. Однако для практических приложений такая ширина спектра позволяет поднять чувствительность детектирования за счет сбора суммарного сигнала поглощения рядом близлежащих линий поглощения углеводородов. Для сравнения основные полосы поглощения метана, построенные на основании базы данных HITRAN92 [1], приведены в верхней части рисунка. Дополнительно на рис. 1 приведен спектр излучения исследованного светодиода, пропущенного через поглощающую ячейку длиной 2.5 см, заполненную метаном под атмосферным давлением. Форма спектра соответствует поглощению излучения углеводородами. Положение максимума спектра излучения при наблюдавшейся ширине спектра светодиода не зависело от величины инжектированного тока. При охлаждении до температуры жидкого азота максимум смещался на  $0.26 \mu\text{m}$  в коротковолновую сторону со средней скоростью порядка  $1.1 \text{ nm/K}$ , что было меньше температурной зависимости энергии запрещенной зоны InAs. В целом спектральные и электрические характеристики могут быть объяснены квазимезонной рекомбинацией в объеме активной области, что согласуется с выводами предшествующих работ [4,5].

В непрерывном режиме выходная оптическая мощность светодиода возрастала практически линейно в области токов накачки до 120 мА. Максимальная непрерывная мощность составила  $130 \mu\text{W}$ . При дальнейшем увеличении рабочего тока происходило насыщение выходной мощности и резкое уменьшение мощности (срыв мощностной характеристики). Это определялось, скорее всего, джоулевым разогревом активной области, поскольку в узкозонных полупроводниках безызлучательные процессы преобладают над излучательными с ростом температуры [11] и с понижением температуры выходная мощность возрастала в соответствии с зависимостью  $P \sim \exp(T/T_0)$ , с характеристической температурой  $T_0 = 56 \text{ K}$ . При токах, превышающих 150 мА ( $\sim 200 \text{ A/cm}^2$ ), исследования были выполнены при импульсном режиме накачки. Максимальная частота модуляции оценивалась нами по суммарному времени нарастания и спада излучения при переключении тока накачки, которое



**Рис. 2.** Зависимость пиковой мощности светодиода при комнатной температуре от длительности импульса при фиксированной частоте повторения импульсов ( $f = 130$  Hz). На вставке показано влияние скважности импульса тока на максимальную пиковую мощность светодиода и построены зависимости для тока инжекции 0.4, 1 и 2 А. Наивысшая пиковая мощность достигается при скважности  $\sim 1.6 \cdot 10^2$ . На вставке квадраты соответствуют режиму питания, когда скважность менялась за счет длительности импульса тока, а частота повторения импульсов была фиксирована и составляла 130 Hz. Треугольники соответствуют переменной частоте повторения и постоянной длительности импульса тока —  $1 \mu\text{s}$ .

при комнатной температуре составляло порядка  $\sim 50\text{--}100$  ns. Поэтому при наших измерениях частота модуляции была ограничена диапазоном частот ниже 10 MHz. Отметим, что оно является достаточным для большинства приложений, поскольку допускает модуляцию на частотах, превышающих тепловые шумы. Для исследования токовых режимов, при которых достигается максимальная импульсная мощность излучения, измерения были выполнены в зависимости от скважности ( $c = 2 \div 1 \cdot 10^3$ ) и длительности ( $\tau = 3\text{ms} \div 5\mu\text{s}$ ) импульса тока. На рис. 2 представлена зависимость пиковой оптической мощности от длительности импульса тока при фиксированной частоте повторения. Приведенные мощностные характеристики показали сильное влияние параметров импульса накачки на эффективность излучательной рекомбинации и выходную оптическую мощность светодиодов на основе узкозонных соединений InAs/InAsSbP. Зависимость, построенная для длительности импульса  $3\mu\text{s}$  (скважность 2.6), в области малых токов была близка к зависимости, полученной для непрерывного режима питания, причем для области токов свыше 100–150 mA наклон вольт-амперной характеристики изменялся и зависел от амплитуды тока. При импульсном питании различие в эффективности наблюдалось для области токов  $I$  выше  $\sim 0.6$  A, что свидетельствовало о существенном усилении безызлучательных потерь за счет разогрева диода при больших токах накачки ( $I > 0.6$  A). Для более коротких импульсов разогрев диода начинает сказываться при больших токах и выходная мощность диода практически линейно нарастает с током до  $I = 2$  A. В целом измерения показали, что насыщение ватт-амперных характеристик светодиодов при больших уровнях накачки ослабевает при импульсах короче 0.5 ms. Зависимость выходной мощности от скважности тока была исследована при различных амплитудах тока 0.4, 1 и 2 A (см. вставку на рис. 2). На вставке квадраты соответствуют режиму питания, когда скважность менялась за счет длительности импульса тока, а частота повторения импульсов была фиксирована и составляла 130 Hz. Треугольники соответствуют переменной частоте повторения и постоянной длительности импульса тока —  $1\mu\text{s}$ . Все зависимости продемонстрировали следующие общие закономерности. Максимальная пиковая мощность достигалась при условиях питания, когда скважность составляет величину  $\sim 10^2$ . При превышении этого значения мы наблюдали насыщение и падение выходной оптической мощности (см. зависимости, построенные для токов инжекции 0.4 и 1 A на вставке к рис. 2). Причины наблюдавшихся

ограничений, по-видимому, могут быть связаны с тем, что, с одной стороны, длительность импульса начинает приближаться к собственному времени жизни носителей, а с другой стороны, возможно, с ограничением полосы пропускания регистрирующей системы. Достигнутая максимальная оптическая мощность составляла  $2.4 \text{ mW} @ I = 2 \text{ A}$ ,  $\tau = 5.0 \mu\text{s}$ ,  $f = 130 \text{ Hz}$  (скважность  $1.6 \cdot 10^2$ ). Хотелось бы отметить, что данное значение превышает значение выходной оптической мощности светодиодов  $\text{HgCdTe} \sim 0.048 \text{ mW}$  ( $\lambda = 3.2 \mu\text{m}$ ,  $I = 15 \text{ mA}$ ), большие токи накачки которых были невозможны из-за высокого последовательного сопротивления ( $R \sim 80 \Omega$ ) [3]. Более того, полученные в настоящей работе значения мощности привлекательны по сравнению с результатами, полученными ранее на  $\text{InAs/InAsSbP}$  светодиодах:  $\sim 0.031 \text{ mW}$  [5],  $0.33 \text{ mW}$  ( $I = 400 \text{ mA}$ , скважность  $\sim 6$ ) [6],  $0.4 \text{ mW}$  ( $I = 200 \text{ mA}$ , скважность  $\sim 2$ ) [7] и  $0.05 \text{ mW}$  ( $I = 100 \text{ mA DC}$ ) [8] при комнатной температуре и тех же длинах волн.

Таким образом, нами созданы светодиоды с максимумом излучения на длине волны  $3.3 \mu\text{m}$  и шириной спектра (FWHM) —  $0.5 \mu\text{m}$ . Диоды были разработаны для портативных газоанализаторов превышения предельно допустимой концентрации углеводородов: метана, этана, пропана и других газов. Показано, что в диодах на основе двойной гетероструктуры  $\text{InAs/InAsSbP}$  при комнатной температуре может быть достигнута непрерывная оптическая мощность —  $0.13 \text{ mW}$  (постоянный ток) и максимальная пиковая оптическая мощность —  $2.4 \text{ mW}$  (длительность импульса  $\sim 5.0 \mu\text{s}$ , скважность  $\sim 10^2$ ). Продемонстрирован характер зависимости оптической мощности светодиодов от параметров импульса накачки.

## 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] Mabbitt A., Parker A. // *Sens. Rev.* 1996. V. 16 (3). P. 38–41.
- [3] Hadji E., Bleuse J., Magnea N., Paustrat J.L. // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 67. (18). P. 2591–2593.
- [4] Есина Н.П., Зотова Н.В., Матвеев Б.А., Стусь Н.Н., Талалакин Г.Н., Абишев Т.Д. // *Письма в ЖТФ*. 1983. Т. 9. (7). С. 391–395.

- [5] 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.
- [6] Parry M.K., Krier A. // Electron. Lett. 1994. V. 30 (23). P. 1968–1969.
- [7] Grieteus B., Nemeth S., Borghs G. // Intern. Conf. Mid-infrared optoelectronics. Materials and devices. Sept. 17–18, 1996. Lancaster, UK.
- [8] Matveev B.A., Gavrilov G.A., Zotova N.V., Karandashov S.A., Sotnikova G.Yu., Stus' N.M., Talalakin G.N. // Intern. Conf. Mid-infrared optoelectronics. Materials and devices. Sept. 17–18, 1996. Lancaster, UK.
- [9] Popov A., Sherstnev V., Yakovlev Yu., Baranov A., Alibert C. // Electron. Lett. 1997. V. 30 (1). P. 86–88.
- [10] Литвак А.М., Степанов М.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ЖПХ. 1994. Т. 67 (12). С. 1957–1960.
- [11] Андаспаева А.А., Баранов А.Н., Гусейнов А.А., Именков А.Н., Колчанова Н.М., Яковлев Ю.П. // ФТП. 1990. Т. 24 (10). С. 1708–1714.