ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ В СИСТЕМЕ AlGaInAs–AlGaAs

Ю. А. Бумай¹, О. С. Васьков¹, В. К. Кононенко², В. М. Ломако³, В. В. Паращук², С. С. Поликарпов⁴

¹Белорусский национальный технический университет, Минск ² Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск ³ НП ООО ОМНИТЕЛ, Минск

⁴ НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, С.-Петербург

1. Введение

К факторов, определяющих работу одному ИЗ основных полупроводниковых приборов, относится эффективность отвода тепла от кристаллов внешнюю характеризуемая BO среду, тепловым сопротивлением. Работа при повышенных температурах приводит к быстрой деградации приборов, ухудшению их характеристик и отказу.

В данной работе анализируется структура внутреннего теплового сопротивления R_T мощных полупроводниковых квантоворазмерных гетеролазеров в системе AlGaInAs–AlGaAs. Такие лазерные излучатели служат в качестве источников накачки твердотельных лазеров и волоконных усилителей [1, 2].

2. Методика эксперимента

Исследовались гетеролазеры, маркированные как 35-EZ-1, 53-EZ-1 и 204-ET-2, излучающие на длине волны 780–820 нм (мощность генерации до 0,5–1,2 Вт в стационарном, до 2 Вт в импульсном режиме). Активная область данных квантоворазмерных гетеролазеров включает квантовые ямы AlGaInAs шириной 10 нм и волноводные слои Al_xGa_{1-x}As (толщина 0,15 мкм, $x = 0,3\div0,6$). Слои активной области специально не легировались. Спектральные, пороговые и ваттамперные характеристики и другие выходные параметры гетеролазеров и близких по структуре высокоэффективных излучателей исследовались в работах [3–5].

Методика определения параметров тепловых характеристик излучающих приборов переходных основана исследовании на электрических процессов при разогреве собственным током [6-8]. Температура перегрева активной области лазера ΔT в каждый момент времени t (временное разрешение 2 мкс) рассчитывалась из изменения прямого напряжения, приложенного к лазерному диоду. Величина напряжения измерялась с помощью 16-разрядного АЦП при подаче импульса тока в форме ступеньки. Предварительно определялся температурный коэффициент напряжения γ . Отметим, что измерения при различных токах накачки гетеролазеров проводились во временных интервалах, не допускающих перегрева их активной области выше ≈ 20 К. Типичная зависимость $\Delta T(t)$ для гетеролазеров в системе AlGaInAs–AlGaAs приведена на рис. 1.



Рис. 1. Временная зависимость температуры перегрева $\Delta T(t)$ активной области гетеролазера 53-ЕZ-1 при подаче ступенчатого импульса тока амплитудой 2 А

Исходя из аналогии протекания электрических и тепловых процессов, данная зависимость анализировалась в рамках эквивалентных схем в виде RC-цепочек – схем Фостера и Кауера (см. рис. 2), где Rсоответствует тепловому сопротивлению, а C – теплоемкости элементов гетеролазера и внешнего теплоотвода. При использовании схемы Фостера зависимость $\Delta T(t)$ имеет наиболее простой математический вид:

$$\Delta T(t) = P_T \sum_{i=1}^n R_i \left(1 - \mathrm{e}^{-t/\tau_i} \right), \tag{1}$$

где P_T – мощность, рассеиваемая гетеролазером в виде тепла. По данной формуле с использованием экспериментальной зависимости $\Delta T(t)$ и ее производных по времени вплоть до третьего порядка находилась особая зависимость (спектр тепловых сопротивлений), по экстремумам которой можно оценить тепловое сопротивление отдельных элементов R_i , эквивалентные теплоемкости C_i и соответствующие постоянные времени релаксации тепла $\tau_i = R_i C_i$.

Отметим, что схема Фостера по существу носит формальный характер, так как содержит последовательно соединенные емкости, которые в общем случае нельзя связать с реальными теплоемкостями элементов. Поэтому данную схему необходимо преобразовывать в схему Кауера [9]. Однако величины τ_i последовательных *i*-элементов структуры исследованных гетеролазеров отличаются практически на порядок, вследствие чего R_i , рассчитанные на основе упомянутых выше схем, различаются несущественно.



Рис. 2. Эквивалентные динамические тепловые модели лазерного диода: схемы Фостера (*a*) и Кауера (б)

3. Результаты и обсуждение

Рис. 1 иллюстрирует типичную зависимость температуры перегрева активной области гетеролазеров от времени. Данная кривая содержит информацию о тепловом потоке через различные элементы лазерной структуры – от кристалла к радиатору и, далее, к элементам внешнего теплоотвода. На рис. 3 представлен идентифицированный спектр тепловых сопротивлений гетеролазера 53-EZ-1, построенный на основе полученной зависимости.

В спектре тепловых сопротивлений гетеролазера можно выделить доминирующий пик в области $\tau \approx 1 \div 5$ мс, соответствующий слою посадки кристалла на медное основание. Он вносит определяющий вклад во внутреннее тепловое сопротивление исследованных гетеролазеров (от кристалла до медного основания включительно). Однако при этом, как видно из рис. 4, для различных лазеров тепловые сопротивления слоев посадки достаточно сильно разнятся, что свидетельствует о заметном разбросе их качества.



Рис. 3. Временной спектр тепловых сопротивлений $R_T^*(\tau^*)$ и его идентификация для гетеролазера 53-ЕZ-1



Рис. 4. Участок спектра $R_T^{*}(\tau^{*})$, включающий тепловое сопротивление слоя посадки кристалла для исследованных гетеролазеров

Из анализа температуры перегрева активной области находятся также токовые зависимости кпд гетеролазеров η при условии, что значения тепловых сопротивлений не изменяются с током накачки. Построив спектр тепловых сопротивлений в допороговом режиме, величину кпд излучателей можно оценить по формуле

$$1 - \eta = \frac{\Delta T}{PR_T},\tag{2}$$

где *Р* – полная электрическая мощность, потребляемая гетеролазером.

Зависимости кпд лазерных излучателей от тока накачки, определенные данным способом, приведены на рис. 5. Как следует, кпд исследованных образцов гетеролазеров при накачке вплоть до 3 А достигает значения $\approx 40\pm5$ %. Порог генерации при этом находится в области плотности токов $\approx 150-200$ А/см².

Необходимо отметить достаточно хорошее совпадение кпд лазера 204-ET-2, определенного из тепловых и найденного, для сравнения, из оптических измерений. Небольшое различие может быть связано с тем, что при тепловых измерениях, согласно (2), учитывается интегральное излучение лазерного диода (как направленное вынужденное, так и спонтанное по всем направлениям). Рис. 6 показывает, что значение кпд гетеролазеров, сильно зависящее от тока накачки, слабо изменяется с температурой перегрева кристаллов.



Рис. 5. Зависимости кпд гетеролазеров 35-ЕZ-1 и 204-ЕТ-2 от тока накачки $\eta(I)$, определенные из тепловых и оптических измерений

Отметим, что в процессе измерений произошла деградация гетеролазера 35-EZ-1, в результате чего его кпд снизился до $\approx 5\%$ (рис. 5). При анализе причин деградации этого лазерного излучателя необходимо учесть, однако, что после деградации спектр его тепловых сопротивлений существенно не изменился.

Импульсные вольтамперные характеристики (при измерении которых отсутствовал нагрев кристалла) после деградации также практически не изменились, хотя дифференциальное сопротивление лазерного диода немного уменьшилось (рис. 7), что, возможно, обусловлено наличием микропробоев. Вместе с тем, зависимости температурного коэффициента напряжения γ гетеролазера 35-EZ-1 от тока накачки до и после деградации ведут себя одинаково при токах меньше 1 А (до порога генерации) и существенно различаются при больших токах (в области сильного различия η) (рис. 8).



Рис. 6. Зависимость кпд η гетеролазеров 35-ЕZ-1 и 204-ЕТ-2 от температуры перегрева ΔT при различных токах накачки



Рис. 7. Вольтамперная характеристика *U*(*I*) и дифференциальное сопротивление *dU/dI* гетеролазера 35-EZ-1 до и после деградации



Рис. 8. Зависимость температурного коэффициента напряжения у гетеролазера 35-EZ-1 от тока накачки *I* до и после деградации

Исследования спектра электролюминесценции образца 35-EZ-1 после деградации показали, что ему свойственно светодиодное поведение – спектры испускания заметно отличаются, например, от генерируемого излучения образца 204-ET-2 (рис. 9). Так как деградация носит в основном оптический характер, можно сделать вывод, что она связана с изменением качества и параметров торцов резонатора при воздействии электрического тока и излучения.



Рис 9. Спектры излучения S(λ) образца 35-EZ-1 после деградации (α) и гетеролазера 204-ET-2 (б).
(а) I = 0,7 (1) и 1,7 A (2, 3), температура t = 20 °C, (1, 3) – сw, (2) – импульсный режим;
(б) импульсный режим, I = 0,8 (1), 0,7 (2, 3) и 1 A (4), температура t = 17 (1, 2, 4) и 27 °C (3)

4. Заключение

образом. Таким развитым методом определены тепловые сопротивления элементов структуры лазеров – слоя посадки кристалла на теплоотводящее основание, элементов внешнего теплоотвода [10]. Как определяющий вклад внутреннее установлено, BO тепловое сопротивление гетеролазеров вносит слой посадки кристалла. Из анализа температуры перегрева активной области ($\Delta T < 20 \, \text{K}$) получены также токовые зависимости температурного коэффициента напряжения и кпд гетеролазеров (достигающего $\approx 35-45$ %) при накачке вплоть до 3 А.

Результаты докладывались на VII Международной научнотехнической конференции "Квантовая электроника", 13–16 октября 2008 г., Минск. Работа частично финансировалась БРФФИ по проекту № Ф08МЛД-022.

- 1. Fitzpatrick J. // Photonics Spectra. 1995. Vol. 29, No. 11. P. 105-108.
- 2. Steele R.V. // Laser Focus World. 2006. Vol. 42, No. 2. P. 69-78.
- 3. *Glukhikh I.V., Matveentsev A.V., Polikarpov S.S. et al.* // Technical Program. XI Conf. on Laser Optics. St. Petersburg, 2003. P. 61.
- 4. Bulashevich K.A., Mymrin V.F., Karpov S.Yu. et al. // Semicond. Sci. Technol. 2007. Vol. 22, No. 5. P. 502–510.
- 5. *Манак И.С., Стецик В.М., Ен Цай Пэй и др.* // Сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. "Лазерная физика и оптические технологии". Т. III. Мн., 2008. С. 442–444.
- 6. Hughes J. J., Gilbert D. B., Hawrylo F. Z. // RCA Rev. 1985. Vol. 46. P. 200–213.
- Ryabtsev G. I., Kuzmin A. N., Ges J. A. et al. // J. Appl. Spectrosc. 1995. Vol. 62, No. 5. P. 121–124.
- 8. *Бумай Ю. А., Васьков О. С., Доманевский Д. С. //* Сб. статей. 6-й Бел.–Росс. семинар "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе". Мн., 2007. С. 108–112.
- *9. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. //* Теоретические основы электротехники: в 2-х т. Т. 1. Л.: Энергоиздат. 1981. 536 с.
- 10. Бумай Ю.А., Васьков О.С., Кононенко В.К. и др. // Материалы. VII Междунар. науч.-тех. конф. "Квантовая электроника". Мн., 2008. С. 68.