

УДК 536.5:621.373.8

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ

А. С. Ларькин, Г. В. Белокопытов, Б. Ю. Терлецкий

(кафедра физики колебаний)

E-mail: gvb@phys.msu.ru

Создана и исследована электронная система автоматического регулирования температуры инжекционного полупроводникового лазера (ИЛ) с использованием термистора в качестве датчика температуры и микрохолодильника, работающего на эффекте Пельтье, в качестве исполнительного устройства. Система использована для исследования температурных зависимостей мощности и спектральных характеристик излучения инжекционных лазеров.

### Введение

Основные характеристики инжекционного лазера, такие как пороговый ток, мощность и длина волны излучения, зависят от температуры и тока накачки [1], поэтому для получения стабильных и воспроизводимых характеристик генерации необходимо контролировать как ток инжекции, так и температуру его активной области.

Задача термостабилизации инжекционного лазера решалась в ряде работ [2, 3]. При построении такого рода систем обычно использовалось включение датчика температуры в одно из плеч моста Уитстона, сигнал разбаланса которого усиливался и использовался для управления питанием нагревателя (охладителя), представляющего собой термоэлектрический модуль Пельтье. В эксперименте [3] достигнута величина нестабильности температуры до 1 мК на протяжении интервала времени 1 ч. В настоящее

время существуют также промышленные образцы электронных систем регулирования, предназначенные для стабилизации температуры инжекционных лазеров [4, 5]. Они используют различные типы термосопротивлений в качестве датчика температуры. Долговременный уход температуры стабилизации лазера для этих систем составляет менее 8 мК за 24 ч. Недостатками подобных устройств являются их сравнительно высокая стоимость, трудоемкость в интеграции и настройке конкретного устройства в более сложной многофункциональной системе, отсутствие возможности перестройки температуры в широком диапазоне.

Целью настоящей работы явилось создание системы, которая позволила бы осуществлять не только стабилизацию и регулирование температуры инжекционного лазера, но и быструю ее перестройку в различных физических экспериментах. Разработанная

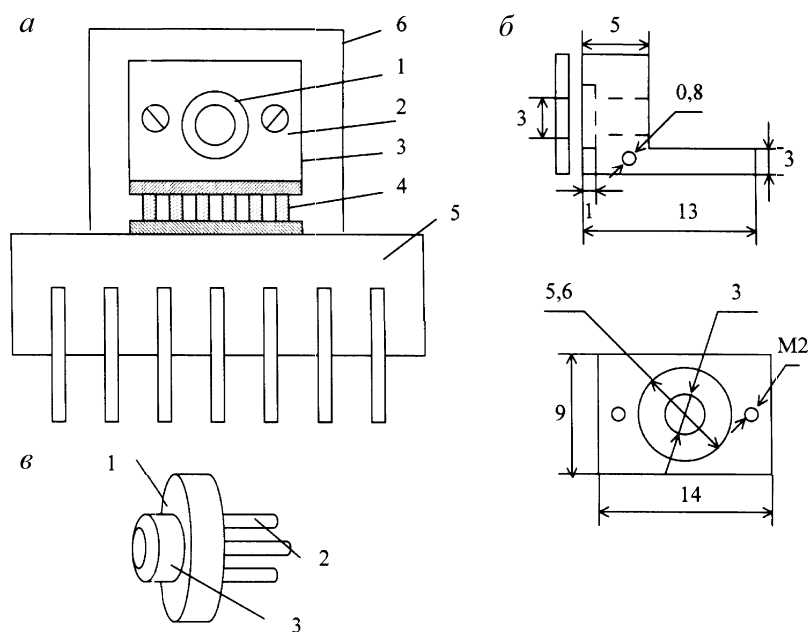


Рис. 1. Конструкция теплоотводящих элементов: а) 1 — инжекционный лазер; 2 — теплоотводящий элемент; 3 — термодатчик; 4 — элемент Пельтье; 5 — радиатор; 6 — медный экран; б) теплоотводящий элемент; в) модуль инжекционного лазера: 1 — корпус; 2 — контакты; 3 — головка с кристаллом лазера

система включает в себя компактный, малоинерционный блок теплоотвода и электронный регулятор.

### 1. Конструкция

Конструкция блока теплоотвода изображена на рис. 1. Она предназначена для работы с источниками излучения, заключенными в стандартный цилиндрический корпус, где наряду с лазерным диодом располагается также фотодиод, необходимый для контроля уровня оптической мощности.

Корпус ИЛ 1, рядом с которым располагается датчик температуры 3, крепится в медном теплоотводящем элементе 2. Размеры теплоотводящего элемента указаны на рис. 1, б. Теплоотводящий элемент закреплен на поверхности термоэлектрического микрохолодильника 4. Другая поверхность микрохолодильника припаяна к медному радиатору 5. Для устранения влияния нестабильного конвективного теплообмена элементы 1-4 заключены в медный экран 6.

При конструировании и настройке электронной схемы регулирования температуры полезно опираться на приближенную модель отвода тепла от инжекционного лазера. Используя аналогию между электрическими и тепловыми цепями, такую модель можно представить в виде цепочки, состоящей из четырех инерционных звеньев, соответствующих основным частям тепловой цепи (рис. 2), и трех источников тепла, которые действуют так же, как источники тока в электрических цепях. В рамках этой модели расчет температуры можно вести подобно расчету значения напряжения в различных точках электрической схемы. Приведем ориентировочные значения тепловых сопротивлений и постоянных времени инерционных звеньев, рассчитанные по известным величинам коэффициента теплопроводности и теплоемкости:  $R_{LD} = 20-60$  К/Вт,  $\tau_{LD} \approx 0.1$  мс;  $R_{HS} = 0.5-1$  К/Вт,  $\tau_{HS} \approx 0.2-0.5$  с;

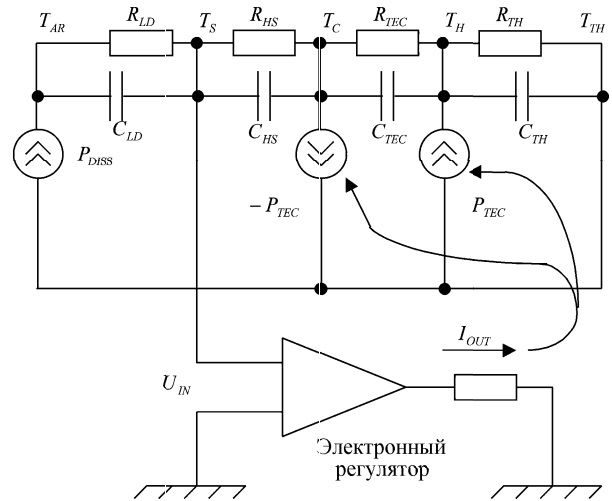


Рис. 2. Эквивалентная схема отвода тепла от инжекционного полупроводникового лазера.  $R_{LD}$ ,  $C_{LD}$ ,  $R_{HS}$ ,  $C_{HS}$ ,  $R_{TEC}$ ,  $C_{TEC}$ ,  $R_{TH}$ ,  $C_{TH}$  — тепловое сопротивление и тепловая емкость полупроводника, медного теплоотвода, элемента Пельтье и окружающей среды (термостата).  $P_{DISS}$  — рассеиваемая мощность,  $-P_{TEC}$ ,  $P_{TEC}$  — поглощаемая и выделяемая мощность на холодной и горячей грани элемента Пельтье. Температуры:  $T_{AR}$  — активной области,  $T_S$  — термодатчика,  $T_C$  и  $T_H$  — холодной и горячей грани элемента Пельтье,  $T_{TH}$  — окружающей среды (термостата)

$R_{TEC} = 0.5$  К/Вт,  $\tau_{TEC} \approx 2-5$  с;  $R_{TH} \geq 2-5$  К/Вт,  $\tau_{TH} \approx 120$  с.

Принципиальная схема электронного регулятора температуры изображена на рис. 3. Основными частями электронной схемы являются датчик температуры, включенный в мостовую схему сравнения, каналы усиления и обработки сигнала ошибки, и исполнительное устройство — тепловой насос, работа которого основана на эффекте Пельтье [6].

В качестве датчика температуры использовано термосопротивление ТР-2. Его чувствительность на рабочем участке температуры от 5 до 20 °С составляет 1.25 кОм/К. Схема сравнения представляет собой мост Уитстона, в одно плечо которого вклю-

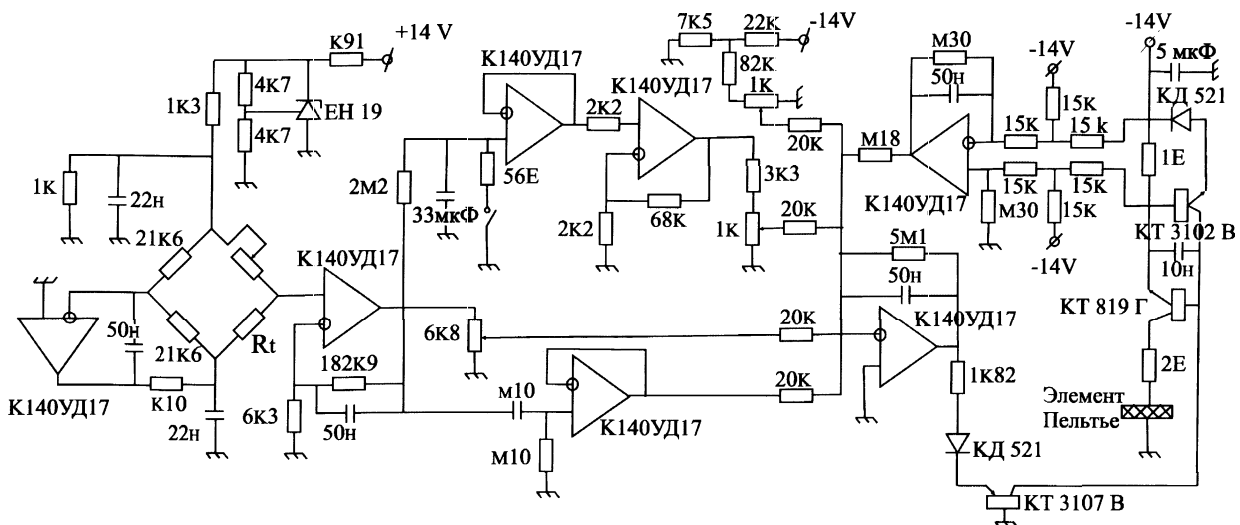


Рис. 3. Принципиальная схема электронного регулятора температуры

чены термодатчик и задающий потенциометр. С помощью потенциометра устанавливается требуемая температура стабилизации инжекционного лазера. Температурный коэффициент постоянных резисторов, включенных в мост Уитстона, составляет  $\pm 6 \times 10^{-4}$  Ом/К.

При неравенстве сопротивлений потенциометра и термодатчика возникает разность напряжений в диагонали моста. Сигнал ошибки с коэффициентом преобразования, примерно равным 3 В/К, подается на включенные параллельно интегрирующий, пропорциональный и дифференцирующий каналы. Эффективное поддержание температуры стабилизации осуществляется за счет работы интегрирующего и пропорционального каналов, дифференцирующий канал введен для уменьшения времени установления при включении системы стабилизации и компенсации быстрых изменений в цепях питания, в частности, накачки. Дифференцирующий и интегрирующий каналы имеют постоянные времена 0.01 и 73 с соответственно. Коэффициенты усиления и постоянные времена каналов подбирались опытным путем, чтобы минимизировать время начального переходного процесса, а также ограничить величину начального тока. Выходные сигналы трех каналов складываются на сумматоре, выходной сигнал которого преобразовывается в ток, поступающий на микрохолодильник.

Исполнительный элемент системы терморегулирования представляет собой термоэлектрический модуль Пельтье К1-31-1/0.8, работающий в режиме микрохолодильника, так что на него поступает ток одной полярности. Соответствующая электронная схема построена с учетом этой особенности.

## 2. Точность стабилизации и особенности работы

Для исследования работы построенной системы была проведена серия наблюдений по установлению и стабилизации рабочей температуры  $8.5^\circ\text{C}$  (здесь и далее приводится температура датчика). Эксперименты проводились с двумя инжекционными лазерами. Для лазера №1 ток накачки составлял  $I_1 = 60$  мА, при выходной оптической мощности  $P_1 \approx 8$  мВт. Для лазера №2 ток накачки составлял  $I_2 = 35$  мА, при выходной оптической мощности  $P_2 \approx 4.5$  мВт. Таким образом, тепловая мощность, рассеиваемая в ИЛ, была в пределах 70–120 мВт.

Основной переходный процесс системы регулирования занимал 3–5 мин, что определялось в основном тепловыми постоянными времени инерционных тепловых звеньев (рис. 2). Для оценки долговременной точности система прогревалась в режиме стабилизации в течение одного часа, после чего снимались показания датчика температуры, представленные на рис. 4. Как видно из рисунка, долговременный уход температуры стабилизации составил около 5 мК за 5 ч для обоих ИЛ. При непрерывной работе

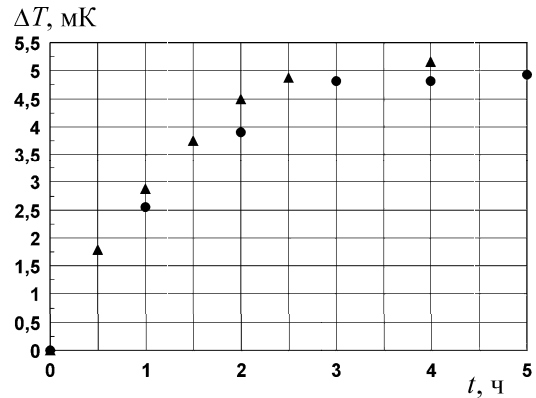


Рис. 4. Долговременная точность поддержания температуры стабилизации ( $T = 8.5^\circ\text{C}$ ) лазеров №1 (▲) и №2 (●)

в течение 24 ч уход температуры составил 9 мК. На фоне долговременного ухода наблюдались также кратковременные (3–5 с) отклонения температуры величиной менее 1 мК. Приведенные выше результаты относятся к обычным лабораторным условиям, когда не принимались какие-либо специальные меры для регулирования температуры окружающей среды.

Точность поддержания температуры оценена и в условиях, когда система стабилизации была помещена в термостат, температура которого плавно изменялась от  $20.4^\circ\text{C}$  до  $38.1^\circ\text{C}$  (при скорости нагрева или охлаждения менее  $0.14$  К/мин). В этом эксперименте максимальное изменение температуры стабилизации составило 28.5 мК, что соответствует  $1.6$  мК/К. Верхний предел указанного интервала соответствует максимальной температуре окружающей среды, при которой система термостабилизации может поддерживать рабочую температуру ИЛ  $T = 8.5^\circ\text{C}$  при максимальном допустимом токе через холодильник, равном 1 А. Указанное ограничение максимального тока обусловлено конструкцией электронной схемы, рассчитанной на выходную мощность 10 Вт. Отметим, что используемый элемент Пельтье допускает работу при токах до 6 А.

Установлено, что при неизменной или слабо меняющейся температуре окружающей среды зависимость температуры стабилизации от времени всегда имеет вид, подобный рис. 4. Это указывает на существование в системе стабилизации релаксационных процессов с характерными временами порядка нескольких часов, которые нельзя объяснить исходя из электрической и тепловой эквивалентных схем. Вероятным механизмом медленных переходных процессов может быть уменьшение тепловых сопротивлений при релаксации механических контактов, вызванной тепловым расширением отдельных частей системы.

Несмотря на то что описанный выше источник нестабильности требует изучения и устранения, уже полученные с данной системой характеристики стабилизации оказались не хуже, чем у промышленно производимых систем, предназначенных для стабилизации температуры ИЛ [4]. При этом в описан-

ной конструкции отсутствуют дорогостоящие компоненты, она относительно проста в изготовлении и настройке и допускает быструю замену активных элементов ИЛ.

### 3. Температурные зависимости характеристик излучения ИЛ

Примером использования созданной системы регулирования в физическом эксперименте может служить исследование температурных зависимостей характеристик излучения ИЛ, ранее использовавшихся для проверки эффективности стабилизации температуры. Инжекционные лазеры представляли собой двойную гетероструктуру (InGa)(AlP) с рабочей длиной волны  $\lambda = 0.65$  мкм.

В интервале температур 8.5–17.5 °С, в пределах которого осуществлялось как ступенчатое, так и плавное изменение температуры, были сняты ватт-амперные характеристики и в предположении об активационном законе зависимости порогового тока  $I_{th} = I_0 \exp(T/T_0)$  определены значения характеристической температуры для двух инжекционных лазеров при  $T = 17.5$  °С:  $T_0 = 62 \pm 15$  К,  $I_{th} = 58$  мА для ИЛ №1 и  $T_0 = 116 \pm 25$  К,  $I_{th} = 29.7$  мА для ИЛ №2.

Перестройка длины волны наблюдалась с помощью отображающего спектрографа, собранного по схеме Эберта, с разрешением 0.005 нм для длин волн в диапазоне 0.6–0.7 мкм. В фокальной плоскости была установлена видеокамера, фиксирующая действительное изображение спектра исследуемого лазера. Изображение одной точки сенсора видеокамеры размером 9 мкм соответствовало спектральному интервалу 0.0026 нм. Сигнал с видеокамеры поступал на компьютер, с помощью которого производилась обработка изображения спектра лазера.

Перестройка длины волны лазера наблюдалась в интервале температур 8.5–17.5 °С при постоянном токе накачки  $I = 63$  мА. С изменением температуры наблюдались такие явления, как плавный сдвиг продольных мод лазерного резонатора, перескоки частот генерации, которые отчетливо фиксировались визуально при увеличении изображения спектра инжекционного лазера в фокальной плоскости спектрографа, перераспределение оптической мощности между модами: при более низкой температуре возбуждались 1–3 продольные моды, а при росте температуры, когда ток накачки становился близким к пороговому, их число достигало 10.

Благодаря многократному увеличению изображения спектра ИЛ в схеме Эберта удалось точно определить расстояние между соседними продольными модами, которое составило 0.1018 нм, что соответствует 70 ГГц. При этом ширина линии была меньше, чем предел разрешения спектрографа (0.005 нм, что меньше 3.5 ГГц).

Согласно проведенным измерениям, длина волны излучения в интервале температур 8.5–17.5 °С изменялась нелинейно, причем для выбранной продоль-

ной моды полный сдвиг составил 0.368 нм. Температурную зависимость длины волны излучения ИЛ на этой моде можно аппроксимировать квадратичной зависимостью:

$$\lambda(T) = \lambda(T_1) \cdot (1 + a_1(T - T_1) + a_2(T - T_1)^2),$$

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda(T_1) \cdot (1 + 2a_2(T - T_1)),$$

где  $\lambda(T_1) = 670$  нм,  $a_1 = 4.5 \cdot 10^{-5}$  К<sup>-1</sup>,  $a_2 = 3.7 \times 10^{-6}$  К<sup>-2</sup>,  $T_1 = 12.7$  °С. Соответственно частота генерации моды зависит от температуры по закону

$$\nu(T) = \nu(T_1) \cdot (1 - a_1(T - T_1) - a_2(T - T_1)^2).$$

Легко найти, что температурный коэффициент частоты при  $T_1$  равен  $-\nu(T_1)a_1 = -20$  ГГц/К. Эта величина согласуется с типичным значением коэффициента температурной перестройки для (InGa)(AlP)-лазеров [3]. Однако, как показывают измерения, температурный коэффициент длины волны даже в сравнительно узком интервале — 9 градусов — заметно (на треть) изменяется с температурой.

Плавное регулирование длины волны излучения ИЛ путем перестройки температуры может найти применение в системах передачи информации, в которых используется метод спектрального уплотнения. В лазерах ИК-диапазона, применяемых в таких системах [7], температурный коэффициент длины волны составляет около 0.05 нм/К, что соответствует 9 ГГц/К. Имея серию идентичных лазеров, можно легко осуществить четырехканальную систему передачи информации со спектральным уплотнением, задавая рабочие температуры ИЛ. Так, если интервал между каналами составляет 25 ГГц, разность температур соседних ИЛ должна составлять примерно три градуса. Таким образом, можно сократить количество технологических вариантов лазеров с различными длинами волн. При этом вклад нестабильности температуры, примерно равный 1 мК, в нестабильность частоты составит около 9 МГц.

Авторы выражают благодарность И.И. Виноградову за помощь в эксперименте по измерению спектров излучения ИЛ.

#### Литература

1. Mroziwicz B., Bugajski M., Nakwaski W. Physics of semiconductor lasers. North-Holland-PWN-Polish Scientific Publication, 1991.
2. Виман К., Холлберг Л. // Приборы для научных исследований. 1991. № 1. С. 3.
3. Брэдли К., Чен Дж., Хьюлетт П. // Приборы для научных исследований. 1990. № 8. С. 38.
4. Проспект фирмы «Wavelength Electronics». 1997.
5. Каталог «ThorLabs». 2001.
6. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. М., 1960.
7. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М., 2000.