

Д. т. н. В. И. ОСИНСКИЙ, к. т. н. В. Г. ВЕРБИЦКИЙ,
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, к. т. н. С. К. ЖУК,
С. В. БОБЖЕНКО, П. А. МЕРЖВИНСКИЙ

Украина, г. Киев, НИИ Микроприборов, Госкомитет промышленной политики, НТУУ "Киевский политехн. ин-т"

Дата поступления в редакцию
15.03 2000 г.

Оппоненты д. т. н. В. А. РОМАНОВ,
В. М. МАРКУС

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МИКРОЛАЗЕРНЫХ УСТРОЙСТВАХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены физические и конструктивно-технологические аспекты охлаждения и температурной стабилизации микролазерных устройств для волоконно-оптических линий связи.

Потребности современного общества в обработке и передаче больших объемов информации удовлетворяются увеличением степени интеграции транзисторных элементов и освоением сверхвысокочастотного и оптического диапазонов частот. Уменьшение размеров элементов и увеличение их количества в замкнутом объеме устройства приводит к увеличению тепловыделения в единице объема и росту температуры активных зон полупроводниковых приборов. Несмотря на рекордный КПД преобразования электрической энергии в оптическую, достигающий 70%, полупроводниковые лазеры являются наиболее мощными элементами микросхем [1], температурная стабильность которых существенно влияет на информационные и эксплуатационные характеристики устройств, их технологическую и функциональную интеграцию [2]. Исследование тепловых процессов с целью термостабилизации микролазерных устройств может проводиться на различных физико-технологических уровнях их создания и функционирования:

1. *Атомно-молекулярный уровень* предполагает изучение взаимодействия электронов с фононами кристаллической решетки и его влияния на квантовый выход излучения и поглощения энергии атомами решетки. Этот уровень определяет, как образуется источник тепловыделения.

2. *Приборный уровень* рассматривает отвод тепла от активной зоны чипа и корпуса микролазера.

3. *Схемный уровень* предусматривает анализ теплового взаимодействия микролазера с другими элементами микросхем, печатных плат и устройств в целом.

4. *Архитектонный уровень* определяет пути термостабилизации характеристик микролазеров и устройств на их основе. Решения могут быть реализованы на атомном уровне, теплофизическом и кибернетическом с автоматической системой регулирования.

Авторы выражают признательность к. т. н. А. А. Мержвинскому и А. А. Воронько за обсуждения и рекомендации при разработке модулей ВОЛС.

Каждый из этих подходов имеет множество конкретных решений, которые зависят от уровня технологии и технико-экономической целесообразности.

В настоящей работе рассмотрены физические и конструктивно-технологические аспекты температурной стабилизации микролазерных устройств для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Поэтому анализируются процессы в гетеролазерах на основе арсенида — фосфида галлия — индия, излучающие в окнах прозрачности кварцевого оптоволокна 1,3 и 1,55 мкм.

Температурная стабилизация внутреннего квантового выхода излучающих структур

Теоретически при низких температурах внутренний квантовый выход рекомбинационного излучения η прямозонных полупроводников типа арсенида галлия равен 100%, т. е. излучательная рекомбинация происходит без образования фононов. Однако с повышением температуры T часть энергии квантовых переходов расходуется на колебания кристаллической решетки.

Энергия тепловых колебаний кристаллической решетки E_{ϕ} характеризуется среднеквадратичными динамическими смещениями атомов $\bar{U}_{\text{дин}}^2$ и связана с характеристическими температурами. Сравнение относительного квантового выхода излучательной рекомбинации с соответствующими значениями характеристических температур θ позволяет построить зависимость интегральной интенсивности рекомбинационного излучения Φ от энергии фононов кристаллической решетки E_{ϕ} . Величину $\bar{U}_{\text{дин}}^2$ можно определить как

$$\bar{U}_{\text{дин}}^2 = \frac{3h^2T}{4\pi^2km\theta^2} \left[\Phi\left(\frac{\theta}{T}\right) + \frac{\theta}{4T} \right],$$

где h — постоянная Планка;

k — постоянная Больцмана;

m — средняя эффективная масса ионов;

$\Phi\left(\frac{\theta}{T}\right)$ — функция Дебая, определяется из таблиц для каждого значения (θ/T) .

Сравнение температурной зависимости интенсивности излучательной рекомбинации $p-n$ -переходов в арсениде галлия, фосфиде индия и твердых ра-

створах InGaAsP с соответствующими температурными изменениями среднеквадратичных динамических смещений показало, что существенное уменьшение интенсивности происходит при тех же температурах, что и существенное возрастание среднеквадратичных динамических смещений [3, с. 217 – 220].

Введем допущение, что интенсивность излучательной рекомбинации $\Phi(T)$ уменьшается по экспоненциальному закону при возрастании величины $\bar{U}_{\text{дин}}^2$, т. е.

$$\frac{\Phi(T)}{\Phi_0} = C \exp\left(-R\sqrt{\bar{U}_{\text{дин}}^2}\right),$$

где Φ_0 – интенсивность рекомбинационного излучения при 77 К;

C – константа;

R – коэффициент, который зависит от концентрации примесей, дефектов и конкретного механизма рекомбинации.

Тогда в прямозонных полупроводниках с каналами безызлучательной рекомбинации квантовый выход краевой люминесценции обратно пропорционален среднеквадратичным смещениям атомов решетки:

$$\ln \frac{\Phi_0}{\Phi(T)} = A + R\sqrt{\bar{U}_{\text{дин}}^2},$$

где $\frac{\Phi_0}{\Phi(T)}$ – величина, обратная относительно квантовому выходу излучательной рекомбинации, а константа $A = \exp C$ характеризует интенсивность излучательной рекомбинации при отсутствии колебаний кристаллической решетки.

Проведенные сравнительные исследования температурной зависимости квантового выхода излучательной рекомбинации на диодах из материалов с различной динамикой решетки показали, что она оказывает существенное влияние на зависимость $\Phi(T)$ через посредство промежуточных центров рекомбинации. При наличии дополнительного канала рекомбинации квантовый выход излучения η уменьшается с повышением температуры по закону

$$\eta = \frac{\beta n p}{\sigma} = 1 + \frac{\beta_6(T)}{\beta_n(T)} + \frac{N_1}{P},$$

где β – вероятность рекомбинации;

n, p – концентрации свободных электронов и дырок, соответственно;

σ – скорость генерации электронно-дырочных пар;

β_n, β_6 – вероятности излучательной и безызлучательной рекомбинации, соответственно;

N_1 – плотность центров захвата дырок;

P – концентрация центров генерации дырок.

Данное феноменологическое соотношение показывает возможность смены характера температурной зависимости квантового выхода излучения $\eta(T) \sim \beta_n(T)$ и, следовательно, $\Phi(T)$ из отрицательной на положительную, т. е. возможно возрастание интенсивности излучения с повышением температуры. Характер температурной зависимости излучения определяется несколькими рекомбинационными процессами, основными из которых являются:

– излучательные межзонные переходы, которые обуславливают краевое излучение;

– излучательные переходы между уровнями ловушечных комплексов «вакансия – примесь» и зонной или между основным и возбужденным состоянием центров захвата;

– безызлучательные переходы, эффективность которых возрастает с возрастанием температуры.

Экспериментальными исследованиями фотолюминесценции арсенида галлия, инжекционной люминесценции $p-n$ и p^+-n -переходов, одиночных и двойных гетероструктур установлено, что участок положительной температурной зависимости при рабочих температурах оптоэлектронных приборов наблюдается в арсениде галлия n -типа, а его температурный интервал в допущении параболических краев зон и низкой концентрации носителей определяется из уравнения [4]

$$\frac{E_g}{kT_2} - \frac{E_g}{kT_1} = 3 \ln \frac{T_2}{T_1} - \ln \frac{n_{02}}{n_{01}},$$

где E_g – ширина запрещенной зоны;

T_1 и T_2 – температуры максимумов рекомбинационного излучения конкурирующего канала в исследуемом и контрольном образцах, соответственно;

n_{01}, n_{02} – соответствующие концентрации носителей.

В арсениде галлия p -типа в исследуемом интервале температурный коэффициент интенсивности всегда отрицательный [4].

Для межзонных прямых переходов, для которых выполняется правило отбора по волновому вектору, проведен машинный эксперимент по определению влияния температуры на скорость излучательной рекомбинации $\gamma(E, T)$ арсенида галлия [5] и фосфида индия. Для расчетов использовалось соотношение

$$\begin{aligned} \gamma(E, T) = & A' \sqrt{\Delta E} - \alpha T \left[1 + \exp \left[\frac{m_v}{m_v - m_c} \left(\frac{\Delta E + \alpha T}{kT} - \frac{F_c - E_c}{kT} \right) \right] \right] \times \\ & \times \left[1 - \exp \left[\frac{-m_c}{m_v - m_c} \left(\frac{\Delta E + \alpha T}{kT} - \frac{F_v - E_v}{kT} \right) \right] \right], \end{aligned}$$

где A', α – коэффициенты;

ΔE – разность энергии испущенного кванта и ширины запрещенной зоны;

m_c, m_v – эффективные массы электронов и дырок;

F_c, F_v – квазиуровни Ферми;

E_c, E_v – соответствующие края зон проводимости и валентной.

A' определяется через константы материала и для арсенида галлия равен $3 \cdot 10^{27} \text{ эВ}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$, для арсенида-фосфида индия $A' = 7 \cdot 10^{25} \text{ эВ}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$; α – калибровочный коэффициент шкалы температур.

Машинный расчет позволяет определить положение уровня Ферми, при которых реализуются положительная, нулевая или отрицательная температурные зависимости интенсивности излучения

(рис. 1). Таким образом, выбор примесного состава и степени легирования активной области излучателей позволяет уменьшить влияние температуры на внутренний квантовый выход, а следовательно, на интенсивность излучения.

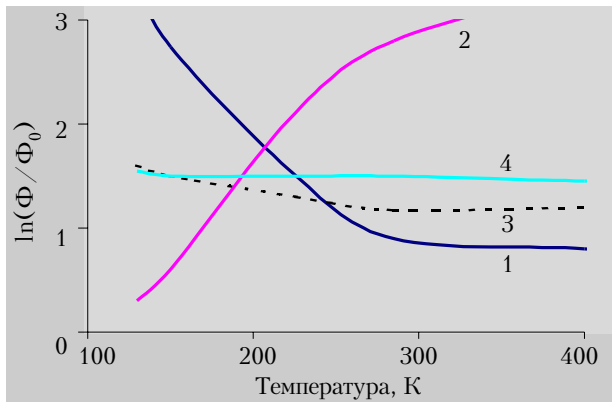


Рис. 1. Температурные зависимости излучения: 1 — *p*-InGaAs; 2 — примесная полоса в *n*-InGaAs; 3 — основная полоса *n*-InGaAs с компенсирующим примесным каналом рекомбинации; 4 — светоизлучающий диод с внешней температурной стабилизацией

В лазерных диодах энергия безызлучательных переходов передается продольным оптическим фононам. В многокомпонентной системе InGaAsP энергия передается решетке при рассеянии на атомах индия, галлия, мышьяка и фосфора. (Существует и обратный процесс отбора подвижными носителями энергии от решетки; в системе может установиться равновесие.) Детальный анализ механизмов поглощения и испускания фотонов и фононов в твердых растворах AlGaAs и InGaAsP показывает, что энергия носителей (электронов и дырок) всегда больше энергии решетки, что равносильно соответствующим значениям их температур (рис. 2). Поэтому при конструировании гетероструктур светодиодов и лазеров горячие носители необходимо отводить в холодные зоны.

Гетероструктуры лазеров для ВОЛС

Рассмотренные тепловые процессы существенно влияют на граничную частоту лазеров, которая умень-

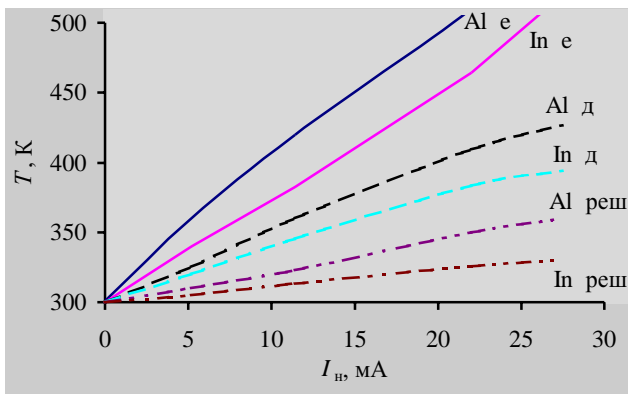


Рис. 2. Сравнение зависимостей температур электронов (е), дырок (д) и кристаллической решетки (реш) от тока накачки I_n для лазеров AlGaAs/GaAs (Al) и InGaAsP/InP (In) с одной квантовой ямой

шается при возрастании температуры, обусловленном увеличением тока накачки. Это является главным ограничением быстродействия лазерных модулей в области до 2–5 ГГц, которое необходимо учитывать при выборе структуры лазеров и конструкции модулей для скоростных ВОЛС.

Как видно из рис. 2, температура дырок ниже температуры электронов при тех же условиях возбуждения. Это означает, что для увеличения граничной частоты необходимо активную область лазеров легировать примесями *p*-типа. Усиление в лазерах прямо пропорционально разности энергий уровней Ферми зоны проводимости и валентной зоны. Из-за меньшей кривизны плотности состояний валентной зоны намного больше, чем в зоне проводимости. В этом случае квазиуровень Ферми остается в запрещенной зоне при более высоких плотностях носителей, чем в случае, когда кривизна валентной зоны аналогична кривизне зоны проводимости. Этого можно достигнуть в напряженных структурах, в которых происходит механическая деформация кристаллической решетки. В структурах с квантовыми ямами нанобласть ямы оказывается зажатой в матрице другого состава с большей E_g . На практике квантовые ямы содержат высокую концентрацию индия, а окружающие области имеют повышенную концентрацию галлия и фосфора. Оценки полученных нами структур с квантовыми точками в системе InGaAsP [6] дают значение дифференциального усиления $7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, что является приемлемой величиной для лазеров с граничными частотами до ~20 ГГц. Однако в реальных приборах более существенными являются ограничения RC-паразитными цепями и тепловым сопротивлением структур.

Специальные методы монтажа кристаллов лазеров позволяют минимизировать тепловое сопротивление и реализовывать частоты, составляющие 70–80% от граничной. Для модулей ВОЛС до нескольких сотен МГц обычно применяются структуры на сильнолегированных подложках n^+ -InP (рис. 3, а). Для более высоких частот, особенно в гигабитном диапазоне, лучшие результаты по граничной частоте дают мезаполосковые структуры (рис. 3, б), которые получают прецизионным плазменным травлением через маску из тугоплавкого материала [7].

Наибольшее применение находят полупроводниковые лазеры на основе твердых растворов InGaAsP, уже в первой работе по которым [3] установлена более слабая температурная зависимость излучения, чем в фосфиде индия и арсениде галлия. Конструктивно лазеры для ВОЛС обычно представляют собой мезаполосковую зарощенную структуру с шириной полоска около 1 мкм (рис. 3). Ватт-амперные характеристики являются линейными в широком диапазоне токов и в диапазоне температур от -40 до +70°C (рис. 4). Такие лазеры в рабочей точке, которая обычно выбирается при токах, в 1,5–2 раза больших порогового значения $I_{\text{пор}}$, являются одномодовыми, однако при меньших токах имеется много мод, число которых возрастает при повышении температуры лазера (рис. 4, вставки).

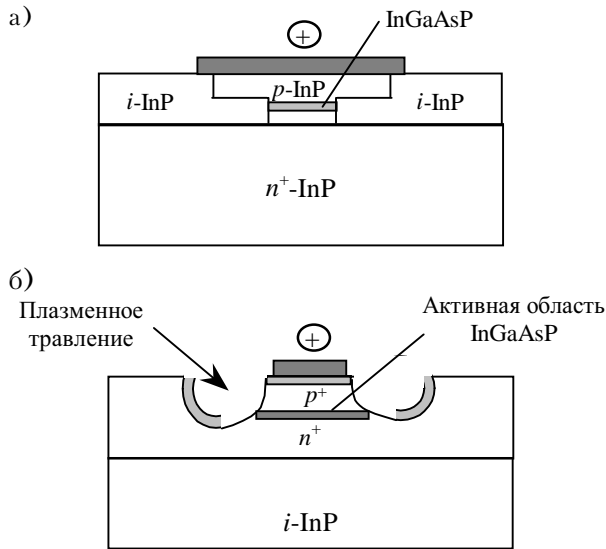


Рис. 3. Структуры лазеров для модулей ВОЛС на проводящей подложке n^+ -InP (а) и на полуизолирующей подложке с прецизионным плазменным травлением мезаструктур (б)

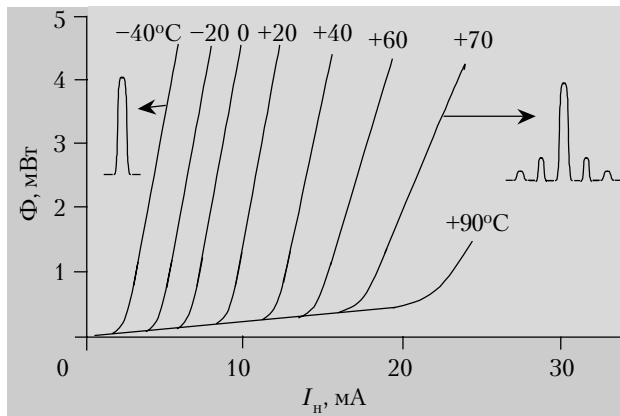


Рис. 4. Ватт-амперные характеристики лазеров InGaAsP/InP при различных температурах (на вставках – соответствующие модовые структуры излучения)

Устойчивый одномодовый режим, который слабо зависит от температуры, обеспечивается в лазерах с распределенной обратной связью. Наиболее качественные дифракционные решетки на поверхности лазера дает метод электронной литографии. В то же время имеют место изменение линейных размеров решетки в зависимости от температуры и соответствующее изменение частоты излучения лазера. В системах с частотным уплотнением каналов этот эффект используется как полезный. Значение частоты излучения лазера каждого канала устанавливается схемой управления температурой лазера путем изменения уставки в схеме контура стабилизации температуры.

Тепловые особенности сборки и герметизации светодиодов, микролазеров и модулей ВОЛС

Наряду с основными тепловыми характеристиками материалов лазеров и их твердотельной структуры, связанными в основном с атомным составом полупроводниковых слоев и микроэлектронной тех-

нологией их получения, важное значение для термостабилизации кристаллов имеет отвод тепла от активных зон полупроводниковых структур, который осуществляется в конструкциях корпусов, обеспечивающих высокое тепловое взаимодействие излучающих чипов с окружающей средой. К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по сборке и герметизации микролазеров и модулей ВОЛС, но тем не менее систематическое изложение тепловых аспектов проблемы отсутствует.

Конструкция корпусов излучающих приборов и модулей ВОЛС на их основе определяется их назначением и составом. Чаще всего приемные и передающие модули изготавливаются в отдельных корпусах. Это повышает выход годных приборов и уменьшает электромагнитное влияние передатчика на приемник.

Для коротких (до 10 км) и малоскоростных (до 10 МГц) линий связи широкое применение находят светодиоды, что обусловлено их более низкой стоимостью и намного более высокой надежностью. На рис. 5 изображены два основных типа конструкции светодиодного узла: светодиод в корпусе ТО-18, где излучение фокусируется двумя линзами для ввода в оптоволоконно, и соединение, называемое "баррас-диод", где волокно приближено к излучающей области светодиода. Такие узлы не требуют точной юстировки элементов, однако коэффициент ввода излучения светодиода в волокно не превышает 0,05. Чип светодиода обычно монтируется на медный теплоотвод, который приваривается к основанию корпуса, что обеспечивает нормальный тепловой режим структуры.

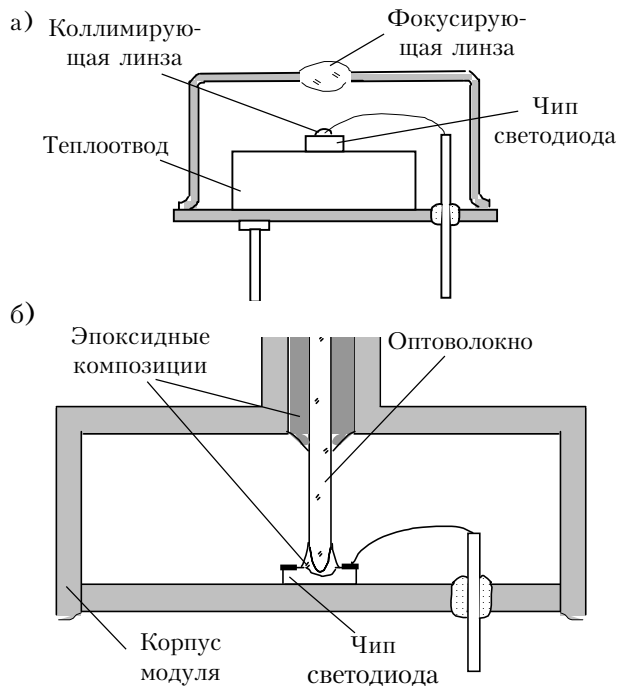


Рис. 5. Конструкции светодиодных излучателей в корпусе ТО-18 (а) и в передающем модуле с оптоволоконном (б)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АППАРАТУРЫ

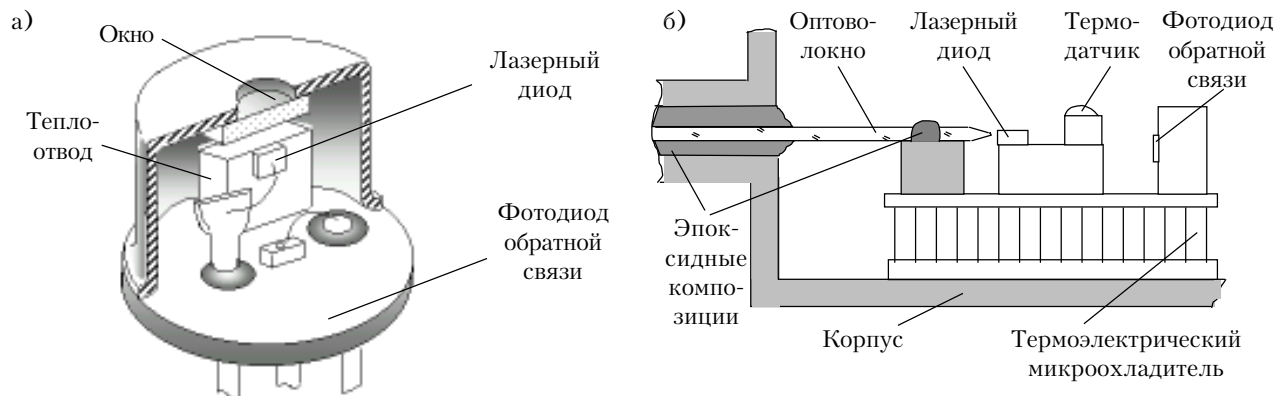


Рис. 6. Конструкции лазерных излучателей в корпусе ТО-18 (а) и в передающем модуле с термоэлектрическим элементом Пельтье и оптоволоконном (б)

С ростом скорости и дальности передачи данных основным типом излучателя становится лазерный диод. На рис. 6 изображены конструкции лазерных узлов: в отдельном корпусе с фотоприемником обратной связи и излучением, выходящим через плоское окно, и в корпусе модуля, где излучение полупроводникового лазера, охлаждаемого с помощью элемента Пельтье, через микролинзу входит в оптоволокно.

Тепловые условия работы лазеров определяют основные информационные характеристики передающих модулей. С ростом температуры увеличивается пороговый ток излучения лазера и уменьшается крутизна ватт-амперной характеристики диода, растет длина волны излучения. Для поддержания минимально необходимого рабочего тока используют корректировку его с помощью фотодиода обратной связи, улавливающего часть излучения лазера. С ростом температуры приходится повышать ток через лазер, что ведет к еще большему его нагреву и снижению ресурса работы.

Рассеиваемая модулем оптического передатчика мощность может быть ориентировочно определена как

$$P = UI - P_{\text{изл}} + P_{\text{инт}}$$

где U — напряжение питания;

I — потребляемый ток;

$P_{\text{изл}}$ — мощность, вводимая в оптоволокно;

$P_{\text{инт}}$ — мощность, выделяемая на интерфейсных элементах (согласующие резисторы $R_{\text{согл}}$ цепей передачи данных, цепи контроля, управления).

В связи с необходимостью обеспечения работы модуля в диапазоне температур окружающей среды ($T_{\text{окр}}$) от -40 до $+85^\circ\text{C}$ [6–8] в особо ответственных сверхвысокочастотных модулях применяются термоэлектрические микроохладители (ТЭМО) (рис. 6, б).

На рис. 7 приведена обобщенная схема расположения тех элементов лазерного передатчика, которые определяют тепловые процессы в нем. В ней выделены следующие источники тепловыделения:

P_1 — тепловая мощность, выделяемая в лазерном чипе — $P_1 = UI - P_{\text{изл прям}} + P_{\text{изл обр}}$, где $P_{\text{изл прям}}$ и $P_{\text{изл обр}}$ — мощность, излучаемая в прямом и обратном направлении;

P_2 — тепловая мощность, выделяемая в узле контрольного фотоприемника;

P_3 — тепловая мощность, выделяемая в узле введения оптического излучения в оптоволокно (вследствие потерь оптической мощности при введении и в объеме оптоэлектронного модуля за счет поглощения прямого и обратного излучения);

P_4 — тепловая мощность, выделяемая в электрической плате —

$$P_4 = U_{\text{пит}} I_{\text{пит}} + P_{\text{инт}};$$

P_5 — мощность, выделяемая схемой управления микроохладителем.

Тепловые потоки приведенной модели могут быть отражены на эквивалентной схеме, показанной на рис. 8, на которой

$+P_{\text{мо}}$ — мощность, выделяемая микроохладителем;

$-P_{\text{мо}}$ — мощность, поглощаемая микроохладителем;

$r_{\text{мо}}$ — тепловое сопротивление микроохладителя;

$r_{\text{ч1}}$ — тепловое сопротивление материала чипа между полоской оптического резонатора и боковой поверхностью посадки на пьедестал;

$r_{\text{п}}$ — тепловое сопротивление пьедестала;

$r_{\text{осн}}$ — тепловое сопротивление основания;

$r_{\text{конт осн}}$ — тепловое сопротивление контакта основания с корпусом;

$r_{\text{увв}}$ — тепловое сопротивление узла вывода оптического излучения;

$r_{\text{конт увв}}$ — тепловое сопротивление контакта узла ввода-вывода с корпусом;

$r_{\text{фпп}}$ — тепловое сопротивление контрольного фотоприемного пьедестала;

$r_{\text{выв фп}}$ — тепловое сопротивление выводов фотоприемника;

$r_{\text{элп}}$ — тепловое сопротивление электрической платы;

$r_{\text{конт элп}}$ — тепловое сопротивление контакта электрической платы с корпусом;

$r_{\text{эл выв}}$ — тепловое сопротивление электрического вывода пьедестала;

$r_{\text{элв1}}, r_{\text{элв2}}$ — тепловое сопротивление соответственно электрических выводов 1 и 2 микроохладителя к электрической плате;

$r_{\text{изл}}, r_{\text{конв}}, r_{\text{тепл}}$ — компонента теплового сопротивления соответственно для теплового излучения, конвекции и кондуктивного теплообмена.

Поскольку корпус оптического передатчика для повышения теплопередающей способности выполняется металлическим, то при работе передатчика тепло от нагретого корпуса рассеивается в окру-

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АППАРАТУРЫ

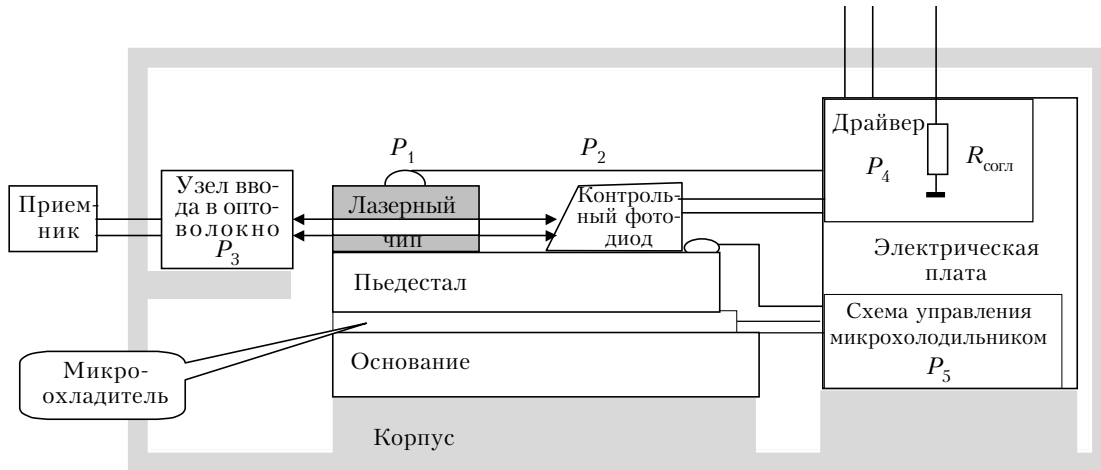


Рис. 7. Тепловая модель конструкции оптического передатчика

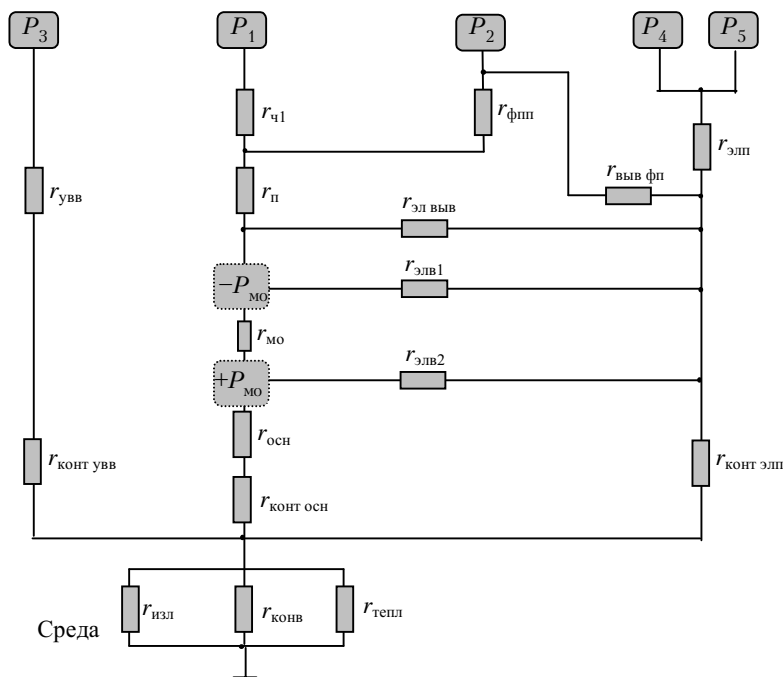


Рис. 8. Эквивалентная тепловая схема конструкции оптического передатчика

жающую среду тремя способами — излучением, конвекцией и кондукцией контактирующих с корпусом элементов. Суммарное тепловое сопротивление от корпуса передатчика к окружающей среде будет определяться тремя параллельно включенными тепловыми сопротивлениями — $r_{изл}$, $r_{конв}$ и $r_{тепл}$, определяющими собой общий коэффициент теплопередачи k , причем произведение $kF\Delta t$ должно быть достаточным для отвода выделяемого передатчиком тепла в окружающую среду (здесь k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C), F — площадь поверхности, м², Δt — тепловой напор «корпус — окружающая среда», °C).

Узел термоэлектрического микроохладителя состоит из датчика температуры, включенного в плечо моста, операционного усилителя и управляемого генератора тока, включенного последовательно с термоэлектрическим элементом (рис. 9). При повыше-

нии температуры выше заданной пороговой мост разбалансируется и через термоэлектрический элемент начинает протекать ток микроохладителя, пропорциональный величине рассогласования.

Исходя из необходимости снижения теплового сопротивления между излучающей областью лазерного чипа и корпусом выбираются конструкция излучателя, материал деталей и способ монтажа. На рис. 10 приведено качественное распределение температуры в лазерном модуле.

Из рис. 10 видно, что использование термоэлектрического микроохладителя, расположенного внутри корпуса оптического передатчика холодной пластиной непосредственно под теплоотводящим пьедесталом, на котором установлен лазерный чип, позволяет максимально снизить температуру $p-n$ -перехода по сравнению с другими рассмотренными вариантами монтажа чипа. Тепло от горячей пластины ТЭМО передается теплопроводностью корпуса к нижней поверхности его основания. Поскольку в

изделии оптический передатчик своим нижним основанием чаще всего устанавливается на печатную плату из стеклотекстолита, обладающего плохой теплопроводностью, то отвод тепла от основания корпуса передатчика как конвекцией воздуха, так и теплопроводностью платы, затруднен, что не позволяет максимально реализовать потенциальные возможности ТЭМО для термостабилизации лазерного чипа.

Для повышения эффективности теплоотвода разработана новая конструкция оптического передатчика с тепловыми микротрубами, схема которого показана на рис. 11. Виды некоторых известных конструкций тепловых микротруб приведены в [9]. Наиболее приемлемыми являются микротрубы круглого и прямоугольного сечения.

В состав передатчика входит несколько тепловых микротруб. Зона испарения одних тепловых микротруб установлена с обеспечением хорошего

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АППАРАТУРЫ

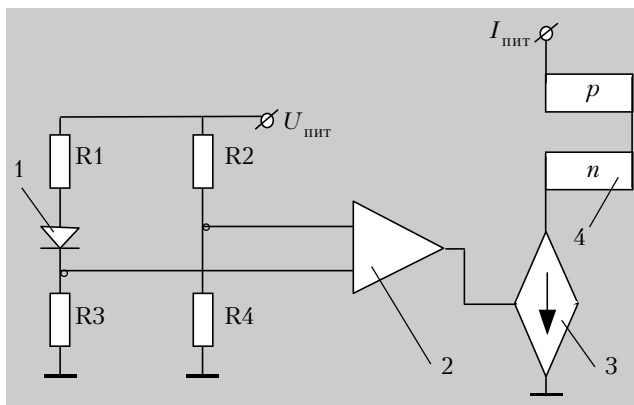


Рис. 9. Схема управления термоэлектрическим микроохладителем:

1 – датчик температуры; 2 – операционный усилитель; 3 – управляемый генератор тока; 4 – термоэлектрический микроохладитель; R1–R4 – резисторы моста

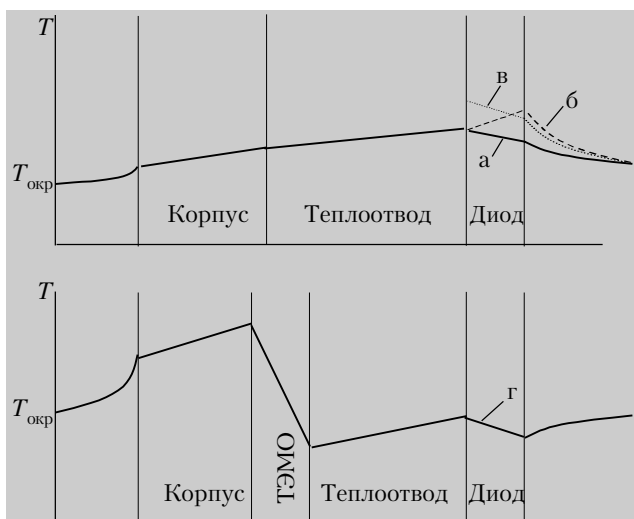


Рис. 10. Диаграммы распределения температуры в лазерном модуле:

а – монтаж $p-n$ -перехода к теплоотводу, б – монтаж подложкой на теплоотвод; в – некачественная пайка кристалла на теплоотвод с образованием теплового зазора; г – при использовании ТЭМО; з – при использовании ТЭМО

теплового контакта в теплопроводном основании, припаянном к горячей пластине ТЭМО, а других – на печатной плате с остальными электрорадиоэлементами передатчика, основание которой выполнено из теплопроводного материала, например по технологии, описанной в [10, с. 52]. Транспортные зоны всех тепловых микротруб выведены сквозь стенки корпуса за его пределы, а зоны конденсации изогнуты вверх и припаяны к радиаторным пластинам, расположенным с двух сторон корпуса передатчика.

Такая конструкция позволяет обеспечить эффективный отвод тепла из теплонапряженных зон, расположенных внутри корпуса передатчика, и эффективное рассеяние ее в окружающую среду – независимо от теплопроводности основания, на котором смонтирован оптический передатчик в изделии.

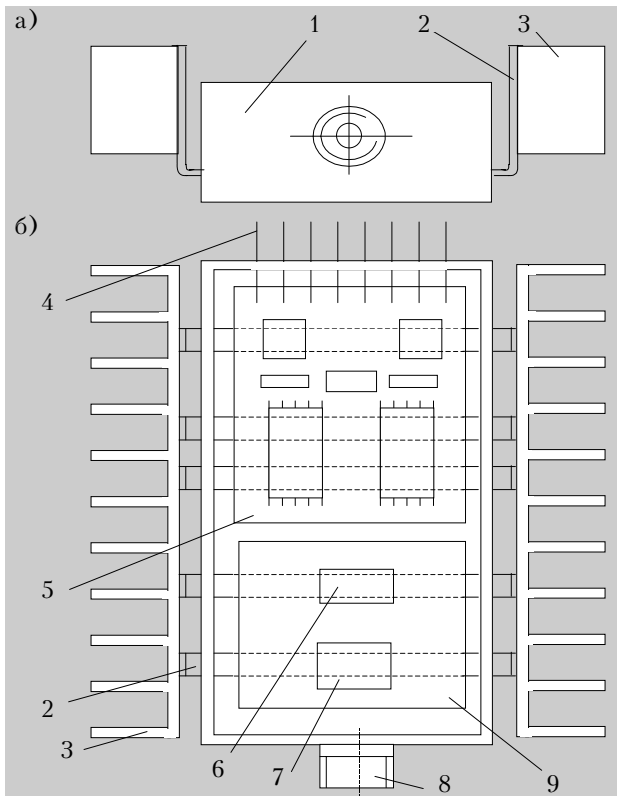


Рис. 11. Конструкция оптического передатчика с тепловыми микротрубами:

а – вид спереди; б – вид сверху (крышка снята)
1 – корпус; 2 – плоские тепловые микротрубы; 3 – охлаждающие ребра; 4 – электрические выводы; 5 – теплопроводная печатная плата с электроэлементами; 6 – контрольный фотодиод; 7 – лазерный чип; 8 – оптический разъем; 9 – пьедестал

Тепловое и электромагнитное взаимодействие элементов лазерных модулей и трансиверов

Тепловые и электромагнитные характеристики лазерных модулей и трансиверов во многом определяются их конструкцией. Можно выделить следующие типы корпусов оптических передающих модулей.

1. Наиболее простой модуль: излучающий прибор (светодиод, суперлюминесцентный или лазерный диод) или фотоприемник (может быть с предусилителем) совмещен с оптической осью кабеля и может быть быстро смонтирован в оптическую цепь:

а) Кристалл, загерметизированный в стандартном корпусе типа TO-18, TO-46, вставлен и отъюстирован в оптическом разьеме типа ST, FC, SC, SMA и нестандартных фирменных (RSD, FSD, IBM, E-2000...). На рис. 12, а изображен такой модуль с разъемом FC. При стыковке с волоконной частью разъема происходит совмещение выпуклой поверхности микролинзы с обработанным торцом оптоволокна.

б) Сборка типа "пиг-тейл". Менее универсальна, но при близком расположении приемника и передатчика снижает потери в оптическом тракте за счет уменьшения числа разъемных соединений. На рис. 12, б показана сборка, в которой загерметизированный конец волокна закреплен вблизи излучающей или приемной зоны кристалла. Другой конец заканчивается стандартным разъемом ST.

Для рассмотренных простейших конструкций модулей ВОЛС проблемы электромагнитного взаимодействия не являются существенными.

2. Специальные металлические корпуса.

Чаще всего они изготавливаются с разъемом типа "пиг-тейл" с высокоэффективным подключением оптоволоконна непосредственно к кристаллу излучателя или фотоприемника. Реже разъем устанавливается на корпусе.

По сравнению с пластмассовыми металлические корпуса более эффективны с точки зрения теплоотвода и использования для этой цели элементов Пельтье, что позволяет применять их для более мощных источников излучения. Избыточное количество металлостеклянных выводов дает возможность в том же корпусе размещать сборки различной сложности: с элементами Пельтье, фотоприемниками обратной связи, электрической схемой обработки сигнала. При этом выводы можно располагать вертикально или горизонтально (рис. 12, в, з). Размещение передающего и приемного модулей в отдельных металлических корпусах исключает их электромагнитное взаимодействие [10].

Корпуса имеют высокую стоимость.

3. Объединенный приемопередатчик – трансивер (transmitter + receiver).

Расширение использования оптоэлектронных модулей в компьютерных и телефонных сетях привело к совершенствованию и удешевлению технологии, что позволило выпускать более удобные приемопередающие модули. В них используются корпусные разъемы ST, FC, SC (рис. 12, д, е) (наиболее удобны в этом случае дуплексные разъемы SC). Расстояние между осями оптических входа и выхода составляет 0,5 или 0,7 дюйма. Высота модуля, как правило, не превышает 0,5 дюйма. Выводы вертикальные. Модуль содержит электрическую схему драйвера и усилителя – формирователя логических уровней.

Можно выделить два типа конструктивов:

а) механическое соединение приемника и передатчика в отдельных корпусах (рис. 12, д) [6];

б) сборка в едином корпусе (трансивер) с экранами, препятствующими электромагнитному влиянию драйвера на усилитель [11, 12] (рис. 12, е).

Для применения в компьютерных сетях корпуса, как правило, полимерные, с отверстиями для вентиляции или без них. Излучатель и фотоприемники используются в герметичных корпусах типа ТО-18 и юстируются аналогично конструкции, показанной на рис. 6, б.

Поскольку в наиболее полном виде все конструктивно-тепловые проблемы сосредоточены в трансивере, рассмотрим пути их преодоления более детально на примере конструирования последних.

В разработанной конструкции трансивера, выполненной в едином корпусе, аналогичном приведенному на рис. 12, е, элементы схемы излучателя и фотоприемника расположены на одной плате и удалены от корпусов излучателя и фотоприемника на расстояние 0,7 см. От излучающего и фотоприемного узлов к плате подсоединены траверсы толщиной 150 мкм. Между фотоприемной и

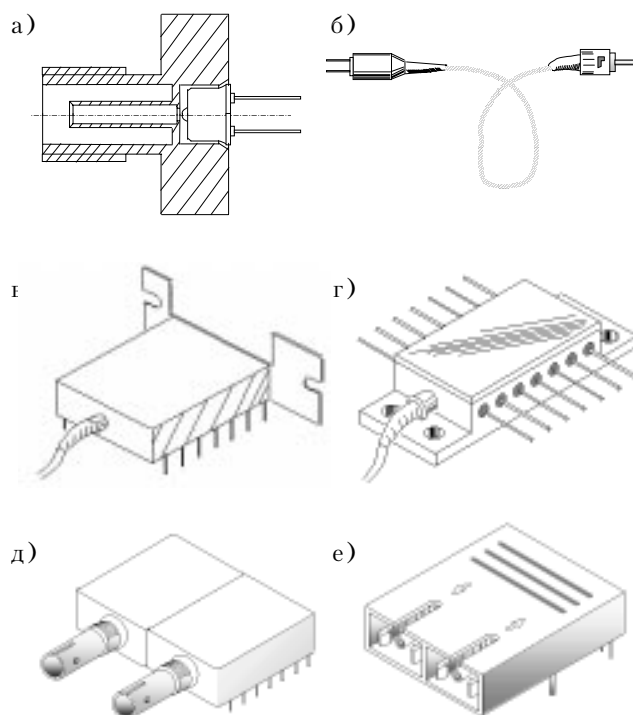


Рис. 12. Конструкции модулей ВОЛС

передающей частью печатной платы устанавливается металлическая пластина, которая служит электромагнитным экраном и теплоотводом.

Для компьютерных сетей длиной до 2 км из микропроцессорных наборов в стандарте FDDI удобно использовать трансиверы с SC-разъемами [9]. Поскольку в одном корпусе размещаются передающая и приемная схемы, возникают проблемы электромагнитной совместимости, которые усложняются с применением плат с особой плотной печатью (размеры элементов 15 мкм). Выходная мощность передатчика составляет 15–20 дБ, оптическая чувствительность приемника до 35 дБ·м.

Скоростные микросхемы эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ) обеспечивают скорости до 1 Гбит/с, что является пределом технологии биполярных транзисторов на кремнии. При таких скоростях ЭСЛ-сигнальные линии передачи должны обеспечивать импедансы от 50 до 75 Ом для согласования с импедансами внешних цепей во избежание отражений. Это достигается использованием специальных RC-фильтров между сигнальными, питающими и "земляными" шинами. Длина сигнальных ЭСЛ-шин выбирается из условия идентичности фаз дифференциальных сигналов: не должно быть сдвига фаз, обусловленного опережением во времени одного сигнала относительно другого. Для этого следует выбирать схему так, чтобы не допускать больших колебаний тока питания, а выводы питания (штыри) должны обеспечивать минимальное сопротивление. Возникающие при этом помехи фильтруются специальными конденсаторами, размещаемыми на печатных платах между "землей" и шиной питания. Наибольшее изменение тока питания возникает в передатчике при генерации лазером сигнального оптического импульса.

Кроме фильтрации напряжения питания, для защиты от помех, возникающих в линиях питания лазера, пере-

дающая часть модуля экранируется от приемной металлическим экраном, который удобно использовать также как теплоотвод. Наиболее чувствительной частью трансивера являются входные цепи усиления сигнала фотоприемника. Как правило, непосредственно рядом с фотоприемником монтируется транзистор первого каскада усиления. Часто фотоприемник и транзистор интегрируются в монолитной схеме на основе гетероэпитаксиальных структур InP/InGaAsP.

Конструктивно фотоприемный узел монтируется в одном блоке с SC-разъемом, от которого к печатной плате идет высокочастотный вывод, соединяющий предусилитель с входом последующего усилителя-формирователя ЭСЛ-уровня. Питание фотоприемной части трансивера также тщательно фильтруется и подается через штыри, которые внутри не связаны гальванически друг с другом. Через выходные транзисторы усилителя-формирователя во время высокого потенциала ЭСЛ-уровня протекает ток около 50 мА, который может вызвать помеху, приводящую к возбуждению каскада. Для исключения возбуждения к выходной шине и соответствующему выводу подсоединяется высокочастотный конденсатор. Таким же образом осуществляется монтаж особо чувствительного к помехам входной цепи предусилителя фотоприемника.

На тепловой режим трансивера наибольшее влияние оказывают выходные транзисторы драйвера и усилителя-формирователя, через которые проходят максимальные токи 50–80 мА. Внутри трансивера они разнесены на максимально возможное расстояние по диагонали корпуса. Такое расположение улучшает тепловой баланс, но увеличивает вероятность электромагнитных наводок из цепи лазера на входные цепи фотоприемной части. Устранение этого взаимодействия достигается экранированием и тщательным выбором фильтров, которые монтируются вдоль монтажных полосок печатной платы.

Для улучшения теплового режима внутри оптоэлектронного модуля перспективно применение рассмотренных выше тепловых труб, которые монтируются непосредственно между корпусом и лазерным узлом или между корпусом и печатной платой.

Проведенный анализ показывает, что тепловые процессы в микролазерных устройствах представляют собой многофакторное явление, определяемое как параметрами лазерной структуры, так и способом отвода от нее тепла в конструктивных вариантах корпусов микролазеров и лазерных модулей ВОЛС.

Тепловые и электромагнитные режимы в ограниченном объеме микросборки модулей ВОЛС, особенно трансиверов, определяются главным образом параметрами микролазеров и входного каскада усилителя фотоприемного узла, которые являются наиболее критичными элементами конструкций.

На основании изложенного выше можно определить следующие рекомендации по созданию модулей ВОЛС с улучшенными информационными и эксплуатационными характеристиками:

– уменьшение тепловыделения в лазерном кристалле путем оптимизации его атомного состава с учетом механизмов поглощения и испускания фотонов;

– сокращение потерь оптической мощности в трансивере путем оптимизации конструкции подсистемы вывода оптического излучения в оптоволокно;

– эффективный отвод тепла от лазера и других тепловыделяющих элементов путем применения микроохлаждителей типа ТЭМО и тепловых микротруб;

– введение контуров управления (включающих датчики рассогласования и независимые цепи стабилизации) оптическим, электрическим и тепловым режимами.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования использовались при разработке и производстве приемопередающих модулей ВОЛС в научно-исследовательском Центре оптоэлектронных технологий НИИ Микроприборов (г. Киев, тел. 4347655, E-mail: osinsky@sabbo.net).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Осинский В. И., Луговский В. В., Николаенко Ю. Е. Микролазерные технологии – стратегия радиоэлектроники и информационной техники Украины // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1997. – № 4. – С. 12–16.
- Осинский В. И., Олексенко П. Ф., Палагин А. В. и др. Проблемы интеграции структур гетероэлектроники с кремниевыми ИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1999. – № 1. – С. 3–17.
- Сирота Н. Н., Осинский В. И. Влияние температуры на квантовый выход рекомбинационного излучения электронно-дырочных переходов в фосфиде индия / В сб.: Химическая связь в полупроводниках и термодинамика. – Мн.: Наука и техника, 1966.
- Osinsky V., Winogradoff N. Excitation and temperature dependence of bandedge photoluminescence in gallium arsenide / Phys. Rev. B. – 1971. – Vol. 31, N 10. – P. 3341–3346.
- Osinsky V., Peshko A. Anomalous temperature dependence of recombination radiation of gallium arsenide // Phys. Status Solidi (a). – 1979. – Vol. 54. – P. 577–584.
- Osinsky V. Optoelectronic properties of heterogeneous semiconductors at superhigh time and space frequencies / Proceedings 5th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology. – Kiev, Sept. 1995, p. 433–436.
- Вербицкий В.Г., Дзян А.С. Плазменное травление силицидов и полицидов тугоплавких металлов // В сб.: Физико-технологические вопросы кибернетики. – Киев: ИК АН УССР, 1984. – С. 25–28.
- Каталог фирмы OKI Electric Industry Co, Ltd. – 1995.
- Николаенко Ю. Е., Кравец В. Ю. Исследование режимов температурной обработки медных оболочек тепловых микротруб // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2000. – № 1. – С. 19–22.
- Практическое пособие по учебному конструированию РЭА / В. Т. Белинский, В. П. Гондюл, А. Б. Грозин и др. Под ред. К. Б. Круковского-Синевича, Ю. Л. Мазора. – К.: Вища школа, 1992.
- Fiber Optic Components Operation. Hewlett-Packard, Ltd. – 1995.
- Воронько А. А., Мерзвинский П. А. Схемотехника оптоэлектронных трансиверов для скоростей 155–1250 Мбит/с / Мат-лы 7-й Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 1997, т. 2, с. 409–412.