

**В Е С Т Н И К
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

ОБЩЕНАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 285

Январь

2005

Серия «Физика»

Свидетельства о регистрации: бумажный вариант № 018694, электронный вариант № 018693
выданы Госкомпечати РФ 14 апреля 1999 г.

ISSN: печатный вариант – 1561-7793; электронный вариант – 1561-803X
от 20 апреля 1999 г. Международного Центра ISSN (Париж)

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК,
посвященный 50-летию организации в ТГУ научного и образовательного направлений
по физике полупроводников**

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 2

**ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
НАУЧНОГО И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЙ**

Вяткин А.П., Кривов М.А., Лаврентьева Л.Г. История организации и становления научного направления по физике полупроводников в Томском университете и Сибирском физико-техническом институте	3
Романова И.Д. Научно-исследовательскому институту полупроводниковых приборов 40 лет.....	13
Лаврентьева Л.Г., Ивонин И.В. Основные этапы развития научного направления по эпитаксии полупроводников в СФТИ.....	17
Воеводин В.Г. Лаборатория полупроводникового материаловедения СФТИ.....	24
Хлудков С.С. Становление и развитие лаборатории физики полупроводников.....	28
Вяткин А.П., Вилисов А.А. Развитие физико-технологических основ создания полупроводниковых приборов	33
Войцеховский А.В., Коханенко А.П. Высокочувствительные приемники оптического излучения	39
Мокроусов Г.М. Физико-химические аспекты электронного материаловедения.....	43
Войцеховский А.В., Гаман В.И., Гермогенов В.П., Ивонин И.В., Лаврентьева Л.Г., Мокроусов Г.М. Подготовка специалистов в области физики и техники полупроводников в Томском госуниверситете.....	47

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ (ОБЗОРЫ)

Караваев Г.Ф., Гриняев С.Н., Чернышов В.Н. Исследование электронных процессов в наноструктурах.....	53
Воеводин В.Г., Чалдышев В.А. Исследование тройных полупроводников $A^2B^4C_2^5$	63
Лаврентьева Л.Г., Вилисова М.Д., Ивонин И.В. Газофазовая эпитаксия арсенида галлия	74
Хлудков С.С. Диффузия примесей в арсениде галлия, диффузионные структуры и приборы	84
Брудный В.Н. Радиационные эффекты в полупроводниках.....	95
Гермогенов В.П. От сплавных контактов к эпитаксиальным гетероструктурам.....	103
Гаман В.И. Электронные процессы в полупроводниковых диодах и структурах металл – диэлектрик – полупроводник.....	112
Вяткин А.П., Максимова Н.К., Филонов Н.Г. Электрофизические свойства структур с барьером Шоттки на GaAs	121
Божков В.Г., Лукаш В.С. Полупроводниковые СВЧ-приборы	129
Криворотов Н.П., Изаак Т.И., Ромась Л.М., Свинолулов Ю.Г., Щеголь С.С. Микроэлектронные сенсоры давления	139
Вилисов А.А. Светоизлучающие диоды	148
Толбанов О.П. Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия.....	155
Войцеховский А.В., Несмелов С.Н. Фотоэлектрические инфракрасные детекторы с управляемой спектральной характеристикой	164

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 172

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ НА РУССКОМ И АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКАХ..... 174

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ

Кратко обсуждаются итоги развития в г.Томске физики и техники светоизлучающих приборов и областей их применения. Рассмотрены ИК-диоды для оптической беспроводной связи, для систем ночного видения, медицинского приборостроения и пр. Основное внимание уделено разработкам мощных излучающих диодов ИК-диапазона.

Становление оптоэлектроники в Томске, как и многих направлений полупроводниковой электроники, неразрывно связано с именем профессора ТГУ В.А. Преснова. В 1961 г. на конференции «Электронно-дырочные переходы в полупроводниках» в г.Ташкенте впервые была озвучена информация о возможности генерации электромагнитного излучения в $p-n$ -переходе из GaAs. Сразу же после конференции (сентябрь-октябрь 1961 г.) по настоянию В.А. Преснова в СФТИ были начаты работы по излучающим приборам на основе арсенида галлия. К этому времени в СФТИ уже был выполнен большой комплекс работ по технологии выращивания и изучению свойств GaAs (А.П. Изергин, М.А. Кривов), по эпитаксии арсенида галлия (Л.Г. Лаврентьева), по методам получения, характеристикам $p-n$ -переходов, способам изготовления омических контактов (А.П. Вяткин). После организации Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов (НИИПП) полупроводниковая оптоэлектроника стала одним из основных направлений в его деятельности. В 1965 г. была сформирована группа разработчиков излучающих приборов из выпускников радиофизического факультета Томского госуниверситета (Ю.К. Пантелеев, И.К. Ковалёв, Е.В. Олексив и др).

В настоящем сообщении кратко изложены основные результаты деятельности НИИПП в области создания светоизлучающих диодов.

1. ИЗЛУЧАЮЩИЕ ИК-ДИОДЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Начальные разработки. Первым крупным достижением раннего периода развития светоизлучающих диодов (СИД) было создание ИК-диода 3Л107. Эффективность световывода из кристалла и пространственное распределение потока излучения в значительной степени зависят от геометрической формы кристалла. Наиболее эффективной формой кристалла для ИК-диодов является сфера Вейерштрасса. На предприятии впервые была разработана высокопроизводительная технология и полуавтоматическое оборудование для шлифовки и полировки сферы с высокими классами точности и чистоты поверхности на каждом диоде в условиях серийного производства [1]. Это позволило довести эффективность световыхода до 25 – 35%. Благодаря этой технологии, и на сегодня, более 30 лет спустя, излучающий диод 3Л107 имеет рекордные в своём классе приборов параметры и пользуется самым большим спросом у потребителей.

В этот период было найдено много ключевых технических решений в разработке светоизлучающих диодов. Впервые в технологии СИД для получения $p-n$ -переходов в арсениде галлия была использована диффузия кадмия вместо традиционного цинка. За счёт меньшей подвижности атомов Cd по сравнению с атомами Zn в решётке GaAs удалось существенно (на порядки) увеличить срок службы СИД. В результате проведённых исследований была разработана технология серийного производства СИД с $p-n$ -переходом, сформированным диффузией Cd [2, 3].

Значимым этапом в технологии изготовления излучающих $p-n$ -переходов стало применение жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) арсенида галлия, легированного кремнием, где $p-n$ -переход формировался во время роста в результате амфотерного поведения Si. Внутренняя квантовая эффективность генерации излучения определяется совершенством $p-n$ -перехода и активной области прибора (однородность по толщине, плотность дефектов и пр.). Исследование взаимодействия полупроводника (GaAs) с расплавленным металлом выявило анизотропию процессов смачивания и растворения полупроводника. Было установлено, что наиболее совершенные $p-n$ -переходы получают на поверхности (111)В. По результатам этих исследований в НИИПП впервые начали использовать в ЖФЭ GaAs подложки с ориентацией (111)В вместо ориентации (100) [4 – 6]. Легирование слоёв GaAs одновременно двумя примесями – кремнием и изовалентной примесью In – позволило улучшить структурное совершенство слоёв, что повысило устойчивость СИД к токовым нагрузкам [7].

Достижение рекордных параметров ИД в серийном производстве привело к тому, что НИИПП стал головным предприятием в отрасли по разработке ИК-излучателей.

Далее последовал продолжающийся до сего времени период широкого использования в технологии СИД твёрдых растворов соединений $A^{III}B^V$, в первую очередь AlGaAs и InGaAsP.

Дальнейшие исследования и разработка СИД велись по нескольким основным направлениям:

- серия разработок с целью повышения мощности излучения диодов;
- создание СИД для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС);
- исследования, направленные на повышение стойкости СИД к дестабилизирующим факторам;
- создание интегрированных оптоэлектронных устройств.

Мощные излучающие ИК-диоды. Разработка мощных светоизлучающих диодов соответствовала общемировой тенденции развития этого класса полупроводниковых приборов, а как направление окончательно сформировалось к 90-м гг. по заданиям оборонных предприятий СССР.

Основная характеристика излучающего диода – мощность излучения для определённой длины волны задаётся квантовой эффективностью исходной полупроводниковой структуры и величиной прямого тока через диод. При конструировании рабочего кристалла излучающего диода усилия разработчиков направлены главным образом на повышение величины коэффициента световывода из кристалла.

Другой важнейший параметр, определяющий мощность излучения диода – протекающий через ди-

од прямой ток. Для повышения мощности излучения необходимо увеличивать прямой ток. Однако здесь имеют место существенные ограничения. Во-первых, при протекании тока через кристалл в нём выделяется тепловая мощность, обусловленная как джоулевым разогревом, так и поглощением в кристалле значительной доли генерируемого излучения. Во-вторых, возможная неоднородность плотности электрического тока, а следовательно, и выделяемого тепла по площади кристалла приводят к существенному снижению эффективности работы диода и его надёжности. И, наконец, с ростом прямого тока через диод увеличивается доля напряжения, падающая на последовательном сопротивлении диода. За счёт этого снижается КПД преобразования электрической энергии в электромагнитное излучение. Эти ограничения обуславливают серьёзные требования к конструкциям кристалла и кристаллодержателя как средства для теплоотвода.

Созданию кристалла для мощного диода предшествовала теоретическая и экспериментальная проработка по оптимизации геометрии кристалла. Для твёрдых растворов AlGaAs изменение состава по толщине слоёв, обусловленное особенностями жидкофазной эпитаксии, приводит к изменению удельного сопротивления материала по толщине слоя. Это означает, что плотность протекающего между контактами электрического тока тоже меняется по толщине слоя. Расчёты и последующие эксперименты показали, что одностороннее расположение омических контактов на многослойных эпитаксиальных структурах типа AlGaAs приводит к низкой надёжности приборов из-за большой локальной плотности электрического тока [8, 9]. Поэтому для излучающих диодов с рабочими токами до 2 – 3 А и более были разработаны кристаллы с двухсторонним расположением омических контактов. Это обеспечило более высокую надёжность диодов и позволило существенно повысить КПД (в два раза) при больших прямых токах. Сконструированный таким образом кристалл размером $1,6 \times 1,6$ мм имеет последовательное сопротивление в несколько десятых долей ома и выдерживает пропускание через него постоянного тока до 3 А. Кристалл напаян мягким припоем на массивный медный держатель, который обеспечивает малое тепловое сопротивление диода 3 – 5 град/Вт.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) разработанных ИК-диодов имеют обычный для диодов с гетеропереходами вид. Естественно, что с увеличением ширины запрещённой зоны материала активной области кристалла возрастает прямое напряжение и последовательное сопротивление диодов. С изменением температуры окружающей среды последовательное сопротивление диодов практически не меняется, а высота потенциального барьера $p - n$ -перехода линейно уменьшается с ростом температуры.

С ростом прямого тока положение максимума спектра излучения смещается в длинноволновую область с коэффициентом около 12 нм/А из-за разогрева активной области кристалла. Тепловая деформация спектра излучения проявляется и при работе излучателей в импульсном режиме. Полуширина спектра излучения при

токе 1 А составляет для ИК-диода 0,035 мкм и увеличивается до 0,05 мкм с ростом тока.

Зависимость полной мощности излучения от величины прямого постоянного тока до 1,5 А имеет линейный характер (при условии применения теплоотвода), при токах более 1,5 А – сублинейный. Нелинейность ватт-амперных характеристик (ВАХ) излучающих диодов в области высоких рабочих токов обусловлена разогревом активной области кристалла, что приводит к снижению квантовой эффективности. Скорость уменьшения мощности излучения с ростом температуры перехода составляет примерно 0,3% на градус.

Следующей проблемой создания СИД с высокой плотностью мощности излучения является разработка внешнего по отношению к кристаллу концентратора излучения. В качестве материала концентратора обычно используется оптически прозрачный компунд. В основе оптических устройств для формирования диаграммы направленности излучения лежит использование геометрических тел с поверхностью второго порядка. Большинство известных технических решений (полусфера, эллипсоид и др.) базируется на эффекте преломления излучения на границе двух сред с различным показателем преломления. Для повышения эффективности концентратора излучения его оптическая система была сконструирована таким образом, что лучи, выходящие из кристалла под углами, большими критического, формируют направленный поток после отражения на поверхности параболоида вращения. Концентратор формируется как единое тело (рис. 1) и представляет собой параболоид вращения с осевым отверстием, дно которого выполнено в виде линзы с апертурой, меньшей критического угла [10,11]. Фокус эллиптической линзы совмещён с фокусом параболоида, в котором находится полупроводниковый кристалл.

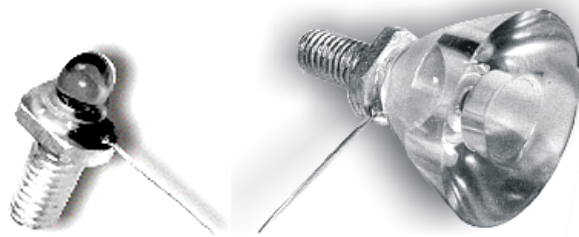


Рис.1. Мощные ИК-диоды

Расчётным путём и экспериментальным подбором оптимизированы геометрические параметры линз для получения потока излучения с заданной полушириной диаграммы направленности. Установлены конкретные зависимости угла излучения от геометрических размеров полимерных линз, что использовано для управления диаграммой направленности излучения диода. Расчётные значения силы излучения диодов с эллипсоидально-параболическими концентраторами с максимальным диаметром 12 и 22 мм составляют 5,5 и 20 Вт/ср соответственно. Экспериментальные значения оказались равными 2,5 – 3,0 и 7 – 9 Вт/ср, что удовлетворительно согласуется с расчётом, если учесть неидеальность поверхностей концентраторов.

В целом диаграмма направленности излучения диода может изменяться в широких пределах путём варьирования геометрических размеров световыводящих линз.

Кинетика процесса деградации излучающих диодов типична для таких структур при плотностях прямых токов около 10^3 А/см² [12]. Имеет место этап «быстрой» деградации, при котором интегральная мощность излучения за 20 – 50 часов снижается на 15 – 20%. Далее идёт этап «медленной» деградации. Чем выше рабочий ток, тем за меньшее время «быстрая» деградация переходит в «медленную» [13]. В процессе наработки на начальном участке прямой ветви ВАХ появляются ступеньки, характерные для токов утечки, что обычно связывают с появлением дефектов структуры в области $p-n$ -перехода. Определение уровня предельно допустимых режимов и оценка параметров надёжности на постоянном токе проводились путём граничных испытаний при ступенчато возрастающей нагрузке (прямой ток и температура). Надёжность в импульсном режиме рассчитывалась с использованием экспериментально найденных значений характеристических параметров процесса деградации. Установлены зависимости времени минимальной наработки диодов от прямого тока и температуры окружающей среды.

Основные параметры разработанных мощных ИК-диодов приведены в табл. 1.

Для установления предельных возможностей диодов проведены исследования характеристик излу-

чающего диода 3Л148А в режиме больших прямых токов [14]. Измерены ВАХ и ВТАХ диодов в диапазоне токов до 200 – 250 А. На диоде 3Л148А достигнута пиковая мощность излучения более 30 Вт. При этом длительность фронта нарастания импульса излучения по уровню 0,1 – 0,9 не превышает 20 нс. Однако вид ВАХ и ВТАХ типичных диодов показывает, что режим импульсных токов 200 – 250 А ещё не является предельным.

Применение ИК-диодов в системах оптической связи с открытым каналом. Одно из основных требований к СИД в системах оптической связи – это повышение их быстродействия. Проведённые совместно с сотрудниками НИИМЭТ (г.Калуга) исследования показали, что скорость формирования импульса излучения (быстродействие) можно регулировать изменением толщины и уровня легирования активной области излучающей структуры. Была выполнена доработка технологии и выращены структуры (НИИМЭТ) для быстродействующих диодов. Эти структуры отличаются от ранее используемых пластин ЭСАГА-136 отсутствием подложки (удаляется после выращивания структур), меньшей общей толщиной твердого раствора AlGaAs, меньшим содержанием AlAs и более высокой концентрацией носителей заряда в поверхностных слоях. На этих эпитаксиальных структурах разработаны три типа диодов (ТОМ-А, Б, В), различающихся быстродействием и, естественно, величиной излучаемой мощности [15] (табл. 2).

Таблица 1

Параметры, обозначение, ед. измерения	АЛ148	ТОМ120С	ТОМ120К	ТОМ120Н	ТОМ120Д
Длина волны излучения, λ , нм	810 – 900	810 – 900	660±15	810 – 900	810 – 950 630 – 700
Мощность излучения, P_e ($I_{пр}$, А), мВт, (мин/макс)	150/200(1А) 700/1100($I_{пр.и}=6А$)	70/140 (0,5А)	25/60 (1А)	150/200 (1А) 700/1100 ($I_{пр.и}= 6А$)	100/180 и 20/60 (1А)
Полуширина диаграммы излучения, 2θ , град.	15 – 30	10 – 30	15 – 30	5 – 10	25 – 40
Сила излучения, I_e , Вт/ср	0,5 – 1,0			5 – 9	

Таблица 2

Наименование параметра, режим измерения, единица измерения	ТОМ-А		ТОМ-Б		ТОМ-В	
	Не менее	Не более	Не менее	Не более	Не менее	Не более
Импульсная мощность излучения (при $I_{пр.и} = 2$ А; $Q = 2$; $\tau_{имп} = 50$ мкс), мВт	430		330		50	
Сила излучения максимальная при $I_{пр} = 1,0$ А, мВт/ср	700		400		200	
Угол излучения, градус	18	25	18	25	18	25
Время нарастания/спада импульса излучения, нс		20		10		5

ВТАХ диодов (рис. 2) практически линейна до токов 3 – 4 А, а мощность излучения при импульсном токе 2 А и времена формирования импульса излучения составили: ТОМ-А – 400 – 500 мВт и 11 – 20 нс; ТОМ-Б – 200 – 330 мВт и 5 – 10 нс; ТОМ-В – 100 – 250 мВт и 3 – 5 нс (рис. 3). Полуширина спектральной полосы излучения составляет около 50 нм. Технологический разброс по центральной длине волны излучения для этих трёх модификаций лежит в пределах

870 – 890 нм. Полуширина диаграммы направленности излучения диодов от 15 до 30 град.

Для применения в оптической связи важным является оптимальное сочетание нескольких параметров, а именно, как можно более высокий КПД и максимальное быстродействие прибора (минимальное время фронтов импульса излучения – τ). Чтобы оценить оптимальность совокупности параметров, можно ввести формальный показатель $F = \text{КПД}/\tau$ [$10^3/\text{нс}$],

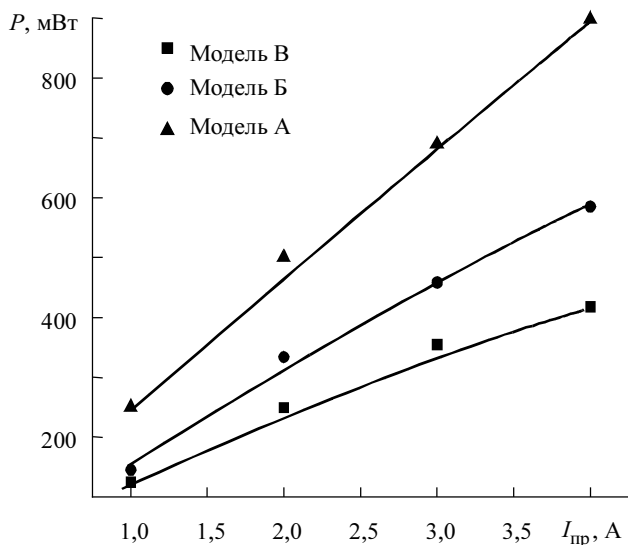


Рис. 2. ВТАХ ИК-диодов серии ТОМ

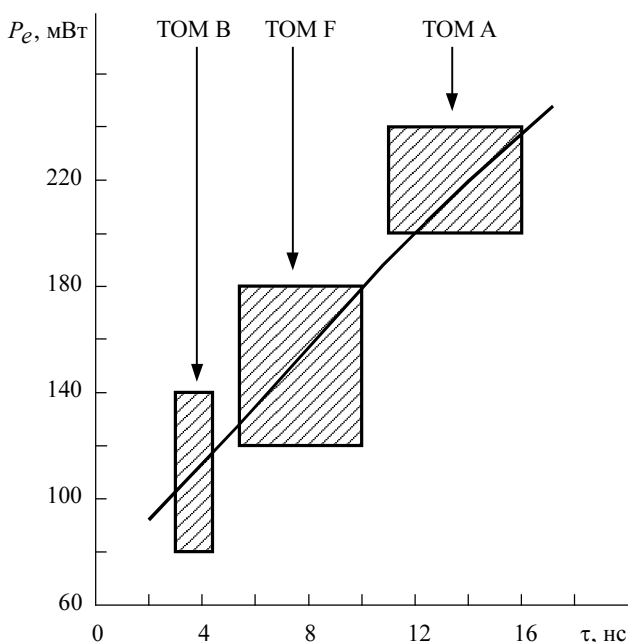


Рис. 3. Области мощность – быстродействие ИК-диодов ТОМ-А, Б, В

характеризующий эффективность ИК-излучающего диода в линиях оптической связи. Анализ характеристик известных излучающих диодов показывает, что самым высоким КПД обладает ИК-диод Том-А (быстродействие 20 нс). За ним следует зарубежный диод OD-780W и отечественный диод 3Л148. Совокупность параметров эффективность – быстродействие оказывается лучшей у линейки диодов Том-А, Б, В всех модификаций ($F = 665$). За ними следуют диоды OD-870W ($F = 244$) и IRS-2-800 ($F = 187$). Таким образом, по совокупности параметров эффективность – быстродействие диоды Том-А, Б, В оказываются лучшими среди известных аналогов и, следовательно, наиболее приемлемыми для высокоскоростных оптических систем связи с открытым каналом. А многообразие вариантов характеристик, гибкое управление ими в процессе изготовления и высокие значения па-

раметров обеспечивают широкие возможности применения мощных ИК-диодов во многих разделах современной техники. Например, использование излучающего диода 3Л148А позволило создать атмосферные линии оптической связи со скоростями передачи информации 10 Мбит/с на дальность до 2 км, транспортные оптико-электронные координаторы, работающие в жестких условиях внешних воздействий, устройства управления траекторией движения малогабаритных объектов на расстояниях до 2,5 км, а также инфракрасные осветители для систем ночного видения с глубиной наблюдения до 50 – 250 м [16 – 20]. В аналогичных осветителях излучающие диоды ТОМ120Н обеспечивают в условиях плохой видимости глубину наблюдения до 400 – 1000 м. ИК-осветители на основе диодов 3Л148А позволили повысить разрешающую способность микроскопических исследований поверхности твердых тел.

ИК-диоды для волоконно-оптических линий связи. Значительную долю в тематике предприятия занимали разработки оптоэлектронных активных элементов для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), которые велись в соответствии с Постановлением Правительства СССР. Выполнен комплекс исследований материалов, в том числе четверных твердых растворов InGaAsP, связанный с переходом на конструкции СИД с малой площадью активной области. Это – исследования эффективности и кинетики электролюминесценции двойных гетероструктур, стабильности характеристик при токовой нагрузке, вопросы быстродействия СИД и оптического согласования излучающей площадки с волокном. В результате были освоены все «окна прозрачности» единственного в то время канала передачи – кварцевого волокна. Для этого разработаны и освоены в серийном производстве излучающие диоды для ВОЛС на длины волн от 0,87 до 1,55 мкм [21, 22]. СИД достаточно широко использовались в разработках систем ВОЛС на многих предприятиях СССР. В разработках существенным техническим шагом был переход к конструкции излучающего диода в виде корпуса оптического разъема и использование в технологии сборки диодов магнитной юстировки. Точное изготовление с последующей инструментальной калибровкой выходного канала корпуса обеспечивало высокие передаточные параметры излучения в волокно с диаметром сердцевины 50 – 200 мкм. Магнитная юстировка обеспечила строгое центрирование максимума потока излучения относительно выходного соединительного канала корпуса.

В развитие работ по созданию активных элементов для ВОЛС существенную роль сыграла разработка оптопреобразователя 3ОД148, на основе которого формировались внутриобъектовые системы связи. Это уже интегральное устройство – монокристалл, содержащий в себе излучающий и приемный элементы, корпусированный в оптическом разъеме [23].

В плане интегральных устройств на предприятии был создан один из первых в стране оптрон 3ОД107 (главный конструктор Б.А. Ничипуренко, в дальнейшем длительное время возглавлял отдел оптоэлектроники). Этот оптрон был освоен в производстве в 1979 г. с использованием кремниевого фотодиода с

полным внутренним отражением [24]. Благодаря комплексу использованных технических решений, этот диодный оптрон до сих пор не превзойдён по совокупности передаточных характеристик.

Применение ИК-диодов в медицинском приборостроении. Технические достоинства светодиодов и достаточно широкий спектр световосприимчивости биологических объектов обусловили то, что в последние годы особую популярность стали приобретать портативные светодиодные терапевтические аппараты. Важнейшим фактором в расширении использования светодиодных аппаратов является идентичность эффектов лазерного и светодиодного облучения организма человека [25, 26]. То есть светодиодные аппараты по терапевтической эффективности не уступают лазерным, а благодаря портативности, простоте обслуживания и использования, низким ценам – доступны широкому слою населения.

Из анализа литературных данных следует, что излучатели для медицинских аппаратов должны иметь терапевтически наиболее значимые частоты – длину волны излучения 630 – 950 нм, полуширину диаграммы направленности 20 – 30° и создавать плотность потока излучения около 20 мВт/см². Подавляющее большинство лечебных методик и конструкций светотерапевтических (лазерных и светодиодных) аппаратов базируется именно на таких характеристиках светового воздействия.

Требованиям к светотехническим характеристикам в полной мере соответствуют разработанные в НИИПП мощные излучающие ИК-диоды и светодиоды. Поэтому появление на рынке диода ЗЛ148А резко активизировало в России разработку светодиодных физиотерапевтических аппаратов. Непосредственно в НИИПП начало разработок светодиодной аппаратуры относится к 1990 – 1991 гг. К 1993 – 1994 гг. были проведены разработки различных вариантов светодиодных аппаратов и, в частности, был создан аппарат «Геска-1». Выпускаемые ОАО «НИИПП» светодиодные аппараты серии «Геска» являются одними из первых аппаратов с одновременным воздействием инфракрасного и красного излучения и предназначены для оздоровления, безлекарственного и сочетанного методов лечения, реабилитации и профилактики многих заболеваний [27 – 33]. Аппараты применяются в хирургии, пульмонологии, стоматологии, отоларингологии, гинекологии, педиатрии, кардиологии, дерматологии, неврологии и др. областях медицины. Во всех применениях отмечаются заметные эффекты обезболивания, противоотёчного и противовоспалительного действия, стимуляция метаболизма тканей, регенеративных процессов, нормализация темпа сердечных сокращений, снижение артериального давления и др.

2. СВЕТОДИОДЫ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Со середины 90-х гг. достижения полупроводникового материаловедения существенно изменили ситуацию в части светодиодов (СД) видимого диапазона. Резкий прорыв в характеристиках светодиодов на коротковолновую часть видимого диапазона спектра

связан с достижениями в выращивании гетеропереходов и квантово-размерных структур на основе нитридов галлия, алюминия, индия. СД видимого диапазона из разряда только индикаторных приборов перешли в разряд энергетических источников излучения [34 – 36].

Основной проблемой применения СД в светотехнике является малая величина светового потока однокристалльных СД. При разработке светодиодов с увеличенным световым потоком использовались излучающие кристаллы на основе нитридов галлия, алюминия, индия. На этих материалах разработаны конструкции многокристалльных источников излучения, обеспечивающие эффективный теплоотвод при повышенных значениях потребляемой мощности. В качестве световыводящего тела использовались линзы различной формы из эпоксидного компаунда. Изменяя форму линзы и её геометрические размеры, формировали диаграмму направленности излучения многокристалльной матрицы до углов излучения 8 – 30 град. При изготовлении белых светодиодов использовали люминофор из алюмо-иттриевого граната, активированного Се, для возбуждения которого применяли кристаллы с длиной волны излучения в максимуме 459 нм.

Установлено, что с увеличением количества кристаллов в матрице светоотдача уменьшается – эффективность матрицы меньше суммы эффективностей однокристалльных СД. Следует учесть, что кристаллы располагались на плоской поверхности держателя, т.е. не использовался отражатель. Кроме того, единичный кристалл всегда наилучшим образом согласован с оптической системой, так как он ближе к выполнению условий точечного источника.

Четырёхкристалльные излучатели зеленого, синего, красного, жёлтого и белого цветов излучения с эллипсоидальнопараболической линзой (рис. 4) имели угол излучения в пределах 10 – 14 град и силу излучения до 30 кд при прямом токе 80 мА. Эти светодиодные источники света могут быть использованы в различных осветительных устройствах.



Рис. 4. Светодиодные излучатели

Для сбора излучения от большого числа кристаллов (20) в небольшой угол излучения (11°) использовалась ступенчатая эллипсоидальнопараболическая линза с максимальным диаметром 40 мм. Такая светодиодная лампа обеспечивает высокую силу света (60 – 65 кд) при малом потреблении электрической энергии (до 1,5 Вт). Эта лампа может быть использована для комплектации систем аварийного освещения производственных и технологических помещений с повышенной взрыво- и пожароопасностью.

Для замены стандартных ламп накаливания в светотехнических системах заградительных огней предлагается использовать многокристальный светодиодный источник красного света для установки непосредственно в конструктив заградительного огня без дополнительных затрат на переоборудование объектов новой арматурой. Потребление электроэнергии такой лампы при силе света не менее 25 кд в угле 180° составляет 6 Вт, что в 10 раз меньше мощности, потребляемой лампой накаливания. Благодаря высокому сроку службы светодиодной лампы (приблизительно 10 лет), можно резко снизить расходы, связанные с необходимостью периодической замены ламп, что особенно актуально для объектов, на которых такие замены связаны с определёнными трудностями (высокие, труднодоступные, отдалённые объекты и др.). Светодиодные лампы стойки к ударам, вибрациям, перепадам температуры, которые легко выводят из строя лампы накаливания.

Для комплектов аварийно-поисковых электроогней в спасательных жилетах с водоактивируемыми батареями разработана светодиодная лампа, активным элементом которой является светодиод белого цвета свечения. Такая лампа обеспечивает силу света не менее 0,75 кд во всех направлениях верхней полусферы при потреблении электроэнергии не более 0,5 Вт. Эти лампы также имеют большой срок службы (до 100 тыс. ч) и высокую механическую прочность.

В разработке полупроводниковых ламп в НИИПП превалирует концепция конструирования многокристальных интегрированных устройств. Ярким примером преимуществ светодиодных ламп являются лампы для речных и морских бакенов. Эти лампы в количестве нескольких десятков тысяч штук уже нескольких навигаций используются в системах речного судоходства РФ и дают значительную экономию пароходства по статье обслуживания. Сравнительные испытания показали, что использование полупроводниковых ламп повышает дальность видимости огней бакенов в два раза при снижении потребляемой мощности в полтора раза. Обеспечивая большую эффективность свечения, полупроводниковые лампы требуют меньших энергетических затрат – на период навигации с запасом хватает одной батареи «БакенВЦ1», тогда как для бакена с лампой накаливания на сезон необходимо три батареи.

Дальность видимости лампы можно легко регулировать путём изменения количества излучающих кристаллов в лампе и прямого тока через кристалл. Так, для речных бакенов красного и жёлтого цвета вполне достаточно разместить в лампе 8 излучающих кри-

сталлов. Модификация лампы с 12 кристаллами имеет более равномерную круговую диаграмму направленности и пригодна для заградительных огней высотных сооружений в окрестностях аэродромов и обозначения посадочных полос, для морских навигационных огней и т.д.

Полупроводниковые лампы изготавливались на основе высокоэффективных излучающих кристаллов красного ($\lambda = 630$ нм), жёлтого ($\lambda = 590$ нм), зелёного ($\lambda = 505$ нм) и синего (с люминофором – белого) свечения. Потребляемая лампой мощность не более 0,5 Вт при световом потоке до 5 лм, а напряжение питания составляло 1,9 В для красных и жёлтых кристаллов и 3,6 В для зелёных и «белых» кристаллов. Белые лампы имели осевую силу излучения не менее 4 кд при токе питания 0,2А. Важным преимуществом полупроводниковой лампы является возможность формирования практически любой диаграммы направленности излучения путём варьирования формы заливки кристаллов компаундом. Разработанные полупроводниковые источники света по своим техническим и эксплуатационным характеристикам значительно превосходят лампы СГВ 2,5 – 0,24, применяемые на речных бакенах.

Создана и установлена система сигнальных огней судоходных пролётов моста через р.Томь [37], которая включает сигнальные фонари зелёного (габариты прохода) и красного (створы) цвета, две солнечные батареи для зарядки аккумулятора в светлое время суток и контроллер, ограничивающий напряжение заряда аккумулятора и обеспечивающий отключение фонарей в дневное время. К схеме питания подключаются 4 створных лампы и 4 габаритных светосигнальных линейки, содержащие по 3 светильника секторного действия. Система полностью автономна и практически не требует обслуживания в течение всего навигационного периода. Для автоматического включения и выключения сигнальной системы в качестве датчика освещённости используется одна из солнечных батарей питания. Эта система сигнальных огней была установлена на мосту через реку Томь, проработала без сбоев пять летних навигаций (2000 – 2004 гг.) и продолжает функционировать в настоящее время. Подобные системы перспективны для установки на островах, удалённых береговых линиях и т.п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие светоизлучающих диодов в Томске прошло путь от начальных этапов получения свечения в $p-n$ -переходе из GaAs до высокоэффективных мощных излучающих диодов и достаточно сложных светотехнических устройств на твёрдых растворах соединений A^3B^5 . Создана и производится широкая номенклатура СИД для систем связи, ночного видения, навигационных и охранных систем, локального освещения и пр. Полупроводниковые СИД на практике подтвердили свои достоинства и являются перспективными для любых систем, использующих электромагнитное излучение ближнего инфракрасного и видимого диапазонов спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лавренко А.В., Воробьев Б.Д.* Технология изготовления кристаллов светодиодов в форме сферы Вейерштрасса // Труды НИИПП. 1973. Вып. 3. Ч. 1. С. 375 – 380.
2. *Пантелеев Ю.К.* Светодиоды на основе $p - n$ -переходов, полученных диффузией кадмия в электронный арсенид галлия // Труды НИИПП. 1972. Вып. 1. Ч. 2. С. 121 – 138.
3. *Пантелеев Ю.К., Айзенберг В.Г., Панкратова Г.А.* Влияние условий диффузии кадмия на электрофизические параметры и характеристики $p - n$ -структур источников ИК-излучения на основе арсенида галлия // Труды НИИПП. 1972. Вып. 1. Ч. 2. С. 157 – 174.
4. *Овчинникова А.П., Пантелеев Ю.К.* Эпитаксиальное выращивание излучающих $p - n$ -переходов на основе арсенида галлия из жидкой фазы // Труды НИИПП. 1972. Вып. 1. Ч. 2. С. 147 – 156.
5. *Пантелеев Ю.К., Васильев А.П., Олексив Е.В. и др.* Получение ПКГ на арсениде галлия эпитаксией из раствора в расплавленном олове // Труды НИИПП. 1972. Вып. 1. Ч. 2. С. 139 – 147.
6. *Олексив Е.В., Орлов В.П., Борецкая М.П.* Технология изготовления эффективных ИК-излучателей // Труды НИИПП. 1973. Вып. 3. Ч. 1. С. 341 – 353.
7. *А.с. СССР № 869506 от 14.05.81.* Способ получения структур арсенида галлия с $p - n$ -переходом / В.Н. Климов, Г.А. Бабченко, А.А. Вилисов, В.П. Воронков, И.П. Климова, В.Г. Мелёв, Л.В. Нигоф, В.П. Орлов.
8. *Вилисов А.А.* Особенности полупроводниковых приборов с односторонним расположением контактов // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1987. № 186. С.6 – 8.
9. *Вилисов А.А., Захарова Г.Н., Кухта А.М.* Особенности мощных излучающих диодов на основе двойной гетероструктуры в системе AlGaAs // Лазерная техника и оптоэлектроника. Сер. 11. Электронная техника. 1987. № 3(43). С.21 – 25.
10. *Пат. РФ № 1819488 от 04.06.91.* Светодиод / Д.Л. Богачёв, А.А. Вилисов, Ю.М. Калинин, С.Н. Днепровский, А.В. Хан.
11. *Богачёв Д.Л., Вилисов А.А., Калинин Ю.М., Днепровский С.Н.* Излучающие ИК-диоды для открытых каналов передачи информации // Электронная промышленность. 1991. № 4. С. 93.
12. *Птащенко А.А.* Деградации светоизлучающих диодов // Ж. прикл. спектр. 1980. Т. 33. № 5. С. 781 – 803.
13. *Вилисов А.А., Захарова Г.Н., Кухта А.М. и др.* Особенности деградации излучающих диодов на основе структур типа GaAs-AlGaAs при работе в области высоких рабочих токов // Электронная техника. Сер. Лаз. техн. и оптоэл-ка. 1990. № 4(56). С. 18 – 20.
14. *Вилисов А.А., Цепелёв Г.М.* Светоизлучающие диоды в режиме больших токов // Электронная промышленность. 2002. № 2/3. С. 101 – 103.
15. *Вилисов А.А., Грабошников В.В., Джанибеков В.А. и др.* Быстродействующие мощные ИК-диоды // Современные проблемы физики и высокие технологии: Материалы Междунар. конф. Томск, 2003. С. 141 – 144.
16. *Дмитриев В.П., Волчков В.П., Вилисов А.А., Захарова Г.Н.* Оценка эффективности применения открытых (атмосферных) оптических каналов связи // Тр. Всес. конф., посв. Дню радио. Москва, 1994. С. 131 – 134.
17. *Вилисов А.А.* Светоизлучающие диоды // Материалы Восьмой Российской конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V». Томск, 2002. С. 356 – 358.
18. *Вилисов А.А., Белоцерковский А.Г., Захарова Г.Н. и др.* Активно-импульсные приборы ночного видения // Электронная промышленность. 2002. № 2 – 3. С. 103 – 106.
19. *Медведев А.В., Белоцерковский А.Г., Вилисов А.А.* Зрительная трубка НЗТ-АИ // Электронная промышленность. 2002. № 2 – 3. С. 152 – 153.
20. *Полубарьев А.В., Белоцерковский А.Г., Вилисов А.А.* Оптико-электронный координатор со светодиодом // Электронная промышленность. 2002. № 2 – 3. С. 106 – 107.
21. *Вилисов А.А., Горбатов Н.А., Купцова Т.А.* Излучающий диод АЛ-141 // Электронная промышленность. 1988. № 4.
22. *Вилисов А.А., Горбатов Н.А., Желудков В.М.* Светодиод для внутриобъектовых ВОЛС // Техника средств связи. Сер. ВОС. 1983. № 2. С. 154 – 160.
23. *Вилисов А.А., Галевко Т.В., Машнич Г.Л., Соснина И.В.* Интегральный оптоэлектронный светодиффузионный диод для ВОЛС // Электронная промышленность. 1988. № 4.
24. *Вилисов А.А., Воронков В.П., Позолотин В.А.* Кремниевые $p - i - n$ -диоды с V -образным отражающим рельефом // ФТП. 1981. Т. 15. № 5. С. 992 – 994.
25. *Готриш И.И., Удут В.В., Прокопьев В.Е. и др.* Лазерная фототерапия (теория и практика). Томск, 1994. 272 с.
26. *Илларионов В.Е.* Медицинские информационно-волновые технологии. М.: Всероссийский центр медицины катастроф «Защита», 1998. 45 с.
27. *Вилисов А.А., Вилисов Г.Т., Захарова Г.Н. и др.* Применение светоизлучающих диодов в медицине // Электронная промышленность. 1993. № 9. С. 98 – 99.
28. *Вилисов А.А.* Светодиоды как альтернатива лазерам в медицине и связи // Laser Market. 1994. № 4. С. 20 – 22.
29. *Вилисов А.А.* Светодиодные аппараты для биологии и медицины // Электронная промышленность. 1998. № 1 – 2. С. 19 – 25.
30. *Вилисов А.А., Захарова Г.Н., Нефёдцева И.В., Коханенко Т.И.* Светодиодные физиотерапевтические аппараты «Геска» и «Виза» // Проблемы оптимизации санаторно-курортной помощи: Материалы науч.-практич. конф. Томск, 1998. С. 21 – 23.
31. *Вилисов А.А., Левицкий Е.Ф., Гриднева Т.Д., Лантев Б.И.* Светодиодная фототерапия // Проблемы оптимизации санаторно-курортной помощи: Материалы науч.-практич. конф. Томск, 1998. С. 18 – 21.
32. *Пат. РФ № 2134128 от 15.04.97.* Стимулятор желудочно-кишечного тракта / А.А. Вилисов, Г.Ц. Дамбаев, А.В. Лавренко.
33. *Белявская О.А., Вилисов А.А., Захарова Г.Н. и др.* Светодиодные устройства для внутриполостной терапии // Электронная промышленность. 1998. № 1 – 2. С. 173 – 178.
34. *Тринчук Б.Ф.* Светосигнальная аппаратура на светодиодах // Светотехника. 1997. № 5. С. 6 – 11.
35. *Коган Л.М., Шмерлинг И.Е.* Полупроводниковые светодиодные излучатели для светосигнальных приборов навигационных знаков водных путей // Светотехника. 1998. № 2. С. 19 – 22.
36. *Коган Л.М.* Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов // Новости светотехники. Вып. 7 – 8 / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Дом света, 2001.
37. *Абрамовский А.П., Бакин Н.Н., Вилисов А.А.* Автономные сигнальные системы с полупроводниковыми источниками света // Электронная промышленность. 2002. № 2 – 3. С. 195 – 197.