



Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005" International Conference "Fizika-2005" Международная Конференция "Fizika-2005"

7 - 9
İyun
June 2005
Июнь

səhifə
page 747-753
стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ОБЛАСТИ 694 нм НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaAlAs

ДЖАХУТАШВИЛИ Т.В., КЕКЕЛИДЗЕ Н.П., МИНДЖИЯ М.Л., ТУЛАШВИЛИ Э.В.,
ЧАРМАКАДЗЕ Р.А.,* ЧИКОВАНИ Р.И., ЧХАИДЗЕ М.А.

*Тбилисский Государственный университет им. Ив. Джавахишвили, Грузия
пр. Чавчавадзе 3, 0128, Тбилиси, Грузия
Эл. почта: nnkekelidze@geo.net.ge*

**Грузинский технический университет, ул. Костава, 77. Тбилиси, 0128, Грузия,
Эл. почта: rchikovani@yahoo.com*

В докладе описана технология получения излучательных гетероструктур на основе твердых растворов $Ga_{1-x}Al_xAs$ методом жидкофазной эпитаксии и создания на их основе импульсных некогерентных источников с излучением в области 694 нм для использования в узкофункциональных устройствах в качестве имитаторов когерентного (лазерного) излучения. Получение гетероструктур проводилось с использованием разработанного авторами метода комбинирования «неограниченного» и «ограниченного» объемов растворов-расплавов структур, позволявшего сравнительно простым способом получить активный слой с так называемым «обратным» распределением Al по толщине эпитаксиального слоя, что обеспечивало высокую эффективность излучения. Таким способом создавались структуры типа $p^+p-p_a-i-n-n^+$, где p^+ соответствует подложке GaAs, а остальные слои являлись эпитаксиальными слоями с различным содержанием x (Al). На полученных структурах методом фотолитографии создавались омические контакты, затем они разделялись с помощью алмазного диска на отдельные излучательные элементы, которые герметизировались на кристаллодержателях с прозрачным компаундом специальной конфигурации, обеспечивающей узкую направленность выходящего излучения. Приведены результаты исследований основных электрофизических параметров и характеристики этих излучателей, в частности, спектры катодо- и электролюминесценции, вольтфарадные, вольтамперные, ваттамперные и импульсные характеристики. Длина волны излучения полученных образцов в максимуме спектральной полосы составила- 694 \pm 2 нм (1,79 эВ). Полуширина диаграммы направленности излучателей составляет 10 – 15 град. Мощность излучения составляет при постоянном токе $2 \cdot 10^{-2}$ А - $(1 - 2) \cdot 10^{-3}$ Вт, а при импульсном токе $5 \cdot 10^{-1}$ А - $(2,5 - 5,0) \cdot 10^{-2}$ Вт., соответственно, внешний квантовый выход составил 3,0 – 5,7%.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые источники некогерентного излучения получили широкое применение в различных областях науки и техники благодаря целому ряду положительных свойств (малые токи и напряжения, габариты, большой срок службы, высокая механическая прочность, сопрягаемость с интегральными схемами, и т.д.) [1]. Одна из областей применения - применение в различного рода узкофункциональных устройствах, таких как метрологические комплексы, дальномерные устройства, системы связи, и т.д., основанных на использовании лазеров, где применение некогерентных излучателей облегчает выполнение вспомогательных операций настройки аппаратуры. В связи с этим вызывает интерес создание некогерентных излучателей – имитаторов когерентного (лазерного) излучения в

области длин волн 694 нм (вместо генерирующих на этой длине волны рубиновых твердотельных лазеров).

В данной работе излучатели в области длин волн 694 нм создавались на основе твердых растворов арсенида галлия – алюминия $Ga_{1-x}Al_xAs$. Целью работы являлось исследование и оптимизация условий выращивания и легирования твердых растворов $Ga_{1-x}Al_xAs$, создание излучающих структур на их основе и полупроводниковых излучателей в указанной выше спектральной области.

Для определения оптимальной конструкции излучающей структуры в процессе работы необходимо было выявить наилучшее сочетание различных электрофизических и излучательных параметров эпитаксиальных слоев, задаваемых в процессе их выращивания.

Основными технологическими параметрами, определяющими свойства эпитаксиальных слоев выращиваемых структур, являются:

- состав твердого раствора активной области структуры, в которой происходит излучательная рекомбинация инжектированных носителей; этот состав определяет ширину запрещенной зоны, и, следовательно, длину волны излучения, а также определяет оптические потери при выводе излучения из структуры;
- особенности выращивания растворов;
- особенности выращивания структур;
- тип проводимости и концентрация носителей тока, определяющие условия инжекции неосновных носителей в активную область структуры, эффективность излучательной рекомбинации и, следовательно, мощность излучения и величину оптических потерь, омичность перехода металлический контакт – полупроводниковый эпитаксиальный слой.

В работе для создания излучателей была выбрана гетероструктура следующего типа: p^+ -GaAs:Zn (подложка) – p -Ga_{1-x1}Al_{x1}As:Zn – p_a -Ga_{1-x2}Al_{x2}As – i -Ga_{1-x3}Al_{x3}As:Te – n -Ga_{1-x3}Al_{x3}As:Te – n^+ -Ga_{1-x4}Al_{x4}As:Te (в этой структуре активная p_a -область представляла тонкий слой твердого раствора с так называемым «обратным» распределением Al по составу). Эти структуры выращивались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) в открытой системе с использованием разработанного авторами сравнительно простого способа комбинирования «неограниченного» и «ограниченного» объемов растворов-расплавов [2].

На этих структурах создавались омические контакты и после разделения на отдельные излучательные элементы проводилась герметизация с целью защиты от внешних климатических и механических воздействий и создания узконаправленного потока излучения.

На полученных излучателях проводились исследования различных электрофизических свойств, в частности, измерялись составы твердых растворов, степень легирования, спектральные характеристики излучения (катодо- и электролюминесцентные), вольтамперные, вольтфарадные и ваттамперные характеристики, переходные (временные) характеристики, определяющие быстродействие излучателей, диаграмма направленности излучения.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являлись твердые растворы Ga_{1-x}Al_xAs (в диапазоне составов содержания по Al 0,20 – 0,45) и структуры типа: p^+ - p_a - i - n - n^+ , где p^+ соответствует подложке GaAs, а остальные слои являлись эпитаксиальными слоями с различным содержанием x (Al).

Основные электрофизические характеристики полученных структур исследовались на изготовленных на их основе корпусированных излучателях.

МЕТОДИКА РАБОТЫ

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ И СТРУКТУР

Для выращивания твердых растворов был использован так называемый «открытый» вариант жидкофазной эпитаксии, описанный в различных работах, например [3, 4]. Как было указано выше, на основе описанной в [2] концепции моделей диффузии из **неограниченных** объемов растворов-расплавов («бесконечный источник») и **ограниченных** объемов растворов-расплавов («конечный источник») для получения активных слоев с «обратным» распределением Al по толщине был использован достаточно простой способ комбинирования «неограниченного» и «ограниченного» объемов растворов-расплавов в процессе роста эпитаксиальных слоев. Получение структур проводилось с использованием пенально-сдвигового контейнера в горизонтальном кварцевом реакторе установки, сконструированной на базе диффузионной печи типа СДД-125/2.

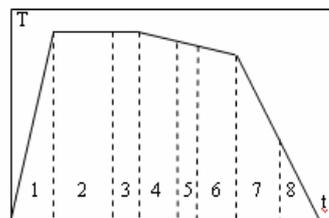


Рис. 1. Температурно-временной график роста слоев

Контейнер приготавливался из графита марки МПГ-7, МПГ-8. Процессы проводились в потоке водорода. Применение «открытого» варианта ЖФЭ предъявляет особые требования к чистоте используемого газа ввиду окисления большинства металлов-растворителей при повышенных температурах. Водород необходимой чистоты (с точкой росы не менее минус 60°C) получался с помощью установки очистки водорода УОВ-1,5. Эпитаксиальные слои выращивались на подложках арсенида галлия марки АГЦЦ-1, ориентированных в плоскости 100 , толщиной (450 ± 10) мкм, легированных Zn до концентрации дырок $(2 - 6) \cdot 10^{19}$ см⁻³. Выращивание структур проводилось методом принудительного охлаждения насыщенного раствора-расплава Ga-Al-As в диапазоне температур $(930 - 890)$ °C. Получение структур проводилось согласно приведенному в [2] описанию технологического процесса в соответствии с температурно-временным графиком (рис. 1), где участок 1 – время нагрева зоны до заданной температуры, 2 - ввод контейнера в зону и выдержка до установления квазиравновесного состояния расплава, 3 – надвиг p -расплава на подложку и установление квазиравновесного состояния между подложкой и расплавом перед началом охлаждения системы, 4 – выращивание p -слоя, 5 – ограничение p -расплава и выращивание активного слоя с обратным распределением алюминия по составу, 6 – надвиг n -расплава и выращивание n -слоя, 7 – ограничение n -расплава, удалении контейнера из зоны и выращивание n^+ -слоя (в условиях резкого увеличения скорости

охлаждения) и 8 – прекращение кристаллизации и охлаждение системы до комнатной температуры.

Быстрое изменение в скорости охлаждения (на участке 7) в ряде случаев приводит к росту n^+ - $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ эпитаксиального слоя толщиной 2 – 10 мкм. В отдельных случаях наблюдалось выращивание слоя практически чистого GaAs на поверхности структуры. С целью обеспечения вывода рекомбинационного излучения из структуры производилось травление структуры в полирующем травителе $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2 = 1:1$ до значения x_4 в слое n^+ - $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, равном 0,43 – 0,40.

Специальных исследований по изучению параметров активного эпитаксиального слоя в зависимости от различных режимов и условий роста при ограничении раствора-расплава в данной работе не проводилось. Толщина ограниченного слоя раствора-расплава находилась в пределах 0,2 – 0,4 мм (имеется определенный интервал из-за разброса в толщинах подложек). Эмпирически установленное время роста активного слоя лежало в пределах 60 – 80 сек. Толщина активного слоя составляла величину порядка 0,1 мкм и менее (по оценкам [2]), а остальных – порядка 20 мкм.

Легирование эпитаксиальных слоев р- и n-типов проводимости осуществлялось соответственно цинком и теллуrom, которые вводились непосредственно в раствор-расплав. Из этих растворов последовательно выращивались слои:

- р-слой – легированный цинком, $p = (0,4 - 2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$;
- n-слой - легированный теллуrom, $n = (5 - 7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (КРИСТАЛЛОВ)

После химической обработки поверхности структур на эпитаксиальный слой наносился диэлектрический слой двуокиси кремния. С помощью процесса фотолитографии на поверхности диэлектрического слоя формировался рисунок, вскрывающий окна для контактных площадок. Формирование омического контакта происходило одновременно как со стороны подложки, так и со стороны эпитаксиального слоя методом гальвано-химического нанесения «сэндвича»: палладий – никель – золото – олово – золото. Необходимость покрытия полупроводниковой структуры палладием была вызвана повышением электропроводности и стойкости контактов в различных средах. Осаждение никеля использовалось для получения неокисляющих контактов. Для обеспечения необходимого омического контакта ввиду высокой химической пассивности и хорошей свариваемости было избрано гальваническое нанесение золота и олова. Верхний омический контакт имел форму квадрата размером 0,12 x 0,12 мм, нижний контакт был сплошным.

После изготовления металлических контактов структуры разделялись с помощью алмазного диска на отдельные излучательные элементы (кристаллы). Размеры излучательного элемента составляли 0,4 x 0,4 мм² (внешний вид излучательного элемента приведен на рис. 2, а).

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ И ГЕРМЕТИЗАЦИИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Основными частями конструкции излучателя являлись излучательный элемент, кристаллодержатель и оптическая светорассеивающая среда (компаунд).

Кристаллы монтировались с помощью специального токопроводящего клея на кристаллодержателе, представляющем собой металлический корпус с двумя выводами, один из которых непосредственно соединен с корпусом, а второй вывод изолирован от корпуса. Затем методом ультразвуковой сварки проводилась разварка межсоединения алюминиевой проволокой (диаметром 30 – 40 мкм) верхней контактной площадки кристалла с изолированным выводом.

После разварки межсоединений проводилась герметизация излучателей компаундом на основе эпоксидной смолы. Для придания компаунду заданной геометрии поверхности использовались специальные заливочные формы, изготовленные из каучука марки СКТН. Эти заливочные формы изготавливались путем заливки каучука в металлические литьевые формы.

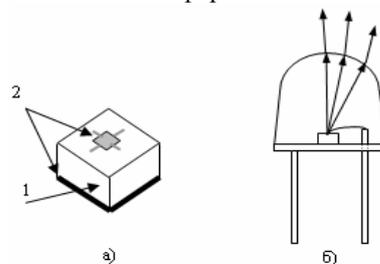


Рис. 2. Внешний вид излучательного элемента (а: 1 – полупроводниковая структура; 2 – металлические контакты) и излучателя (б)

Внешний вид излучателя имеет форму в виде усеченного конуса и полусферы (рис. 2, б). С целью создания необходимой диаграммы направленности теоретически были рассчитаны и размеры и конфигурация полусферы и изготовлены соответствующие заливочные формы. Стрелками показаны направления световых лучей, создающих достаточно узкую диаграмму направленности излучения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Исследование спектров катодолюминесценции (КЛ) проводилось с помощью электронно-зондового микроанализатора “Сатебах” на перпендикулярных к поверхности структур сколах с одновременным анализом состава. Ток электронного зонда составлял 25 нА при ускоряющем напряжении 20 кВ и диаметре зонда 1,0 – 1,5 мкм. По результатам исследований спектров КЛ, в частности по значению длины волны в максимуме спектра, определялась ширина запрещенной зоны полупроводникового материала, и, соответственно, состав эпитаксиальных слоев структуры.

Спектр электролюминесценции (ЭЛ) определялся на установке, основным оптическим элементом

которой являлся монохроматор ИКМ-1; для регистрации излучения использовались фотоумножители ФЭУ-84 или ФЭУ-62. По результатам исследований определялась длина волны в максимуме спектра ($\lambda_{\text{макс}}$) и полуширина спектра. Спектры ЭЛ исследовались в температурном диапазоне минус 60°C - + 70°C с последующим расчетом температурного коэффициента изменения длины волны $\beta = \Delta\lambda/\Delta T$.

Для выяснения характера распределения примесей в области объемного заряда исследовалась зависимость емкости (С) *p-n* перехода от прикладываемого напряжения (V). Измерения емкости светодиодов и вольтфарадных (C-V) характеристик осуществлялись мостовым методом с помощью типового моста МПП-300 на частоте 100кГц.

Измерения мощности излучения $P_{\text{изл}}$ проводились с помощью калиброванного фотодиода ФД-24К, включенного в режиме тока короткого замыкания. По результатам измерений мощности излучения определялся внешний квантовый выход излучательных элементов (кристаллов) по формуле: $\eta_e = P_{\text{изл}}/P_{\text{эл}}$, где $P_{\text{эл}}$ – электрическая мощность излучателя, определяемая выражением: $P_{\text{эл}} = I_{\text{пр}} \cdot U_{\text{пр}}$ ($I_{\text{пр}}$ и $U_{\text{пр}}$ – прямой ток через излучатель и падение напряжения на излучателе, соответственно).

При исследованиях мощности излучения в импульсном режиме подача питания на излучатель осуществлялась от генератора импульсов Г5-27А; длительность импульсов изменялась в интервале 20 – 100 нс, частота следования 1 – 1000 Гц, максимальный прямой ток - $5 \cdot 10^{-1}$ А. В качестве приемника излучения использовался фотоумножитель 14ЭЛУ-ФК. Мощность излучения в импульсном режиме питания при токах более $2 \cdot 10^{-2}$ А определялась в относительных единицах с помощью осциллографа С1-15 с последующим пересчетом в абсолютные значения на основе сравнения значений мощности, измеренных в постоянном и импульсном режимах при токе $2 \cdot 10^{-2}$ А.

Переходные (импульсные) характеристики изучались с помощью осциллографов С1-31 или С7-8. Световой импульс анализировался непосредственно на экране осциллографа. Длительность импульсов генератора устанавливалась на согласованной нагрузке 75 Ом. Время нарастания и спада импульсов составляло не более 10 нс. Время нарастания переходной характеристики осциллографа С1-31 составляло величину не более 7 нс, осциллографа С7-8 – не более 1,5 нс. Быстродействие фотоумножителя 14ЭЛУ-ФК оценивается величиной порядка 5 – 10 нс. Приведенные величины дают возможность оценить переходную характеристику всей системы примерно в пределах 10 – 15 нс.

Диаграмма направленности определялась путем измерения мощности излучения исследуемого образца при его повороте на определенный угол относительно конструктивной оси прибора. Угол излучения (полуширина диаграммы направленности) определялся на уровне 0,5 от максимальной интенсивности, т.е. это есть угол, в пределах которого

интенсивность излучения уменьшается в два раза относительно максимальной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

а) твердые растворы

Результаты исследований зависимости максимума спектра КЛ, и, соответственно, ширины запрещенной зоны соединения $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, от состава твердого раствора (рис. 3), показывают, что энергия максимума полосы линейно возрастает в диапазоне $h\nu = (1,67 - 1,98)$ эВ с увеличением состава слоя от 0,20 до 0,45.

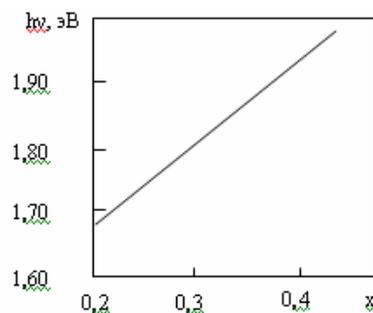


Рис. 3. Зависимость энергии максимума спектра КЛ слоев $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ от состава твердого раствора x

Эти результаты позволили определить составы твердых растворов активной области изготавливаемых структур, необходимые для получения излучения в требуемой области спектра, в частности, наиболее оптимальными были определены следующие значения содержания алюминия в эпитаксиальных слоях структур:

$$x_1 = 0,38 - 0,27; x_2 = 0,27 - 0,28; x_3 = 0,45 - 0,42.$$

б) спектральные характеристики и выбор структуры

Результаты измерений спектров ЭЛ излучателей при комнатной температуре и при постоянном прямом токе $I_{\text{пр}} = 2 \cdot 10^{-2}$ А (типичный спектр приведен на рис. 4), показали, что длина волны в максимуме спектра ЭЛ для различных образцов составляла 694 ± 2 нм (1,79 – 1,78 эВ), а полуширина спектра составляла 18 – 22 нм. Помимо основной полосы красной люминесценции, в спектре наблюдалась также полоса излучения в инфракрасной области спектра с длиной волны в максимуме около 890 нм, интенсивность которой не превышала 5 – 10 % от интенсивности «красной» полосы ЭЛ. По температурным исследованиям спектров ЭЛ было установлено значение коэффициента $\beta = 0,16$ нм/град.

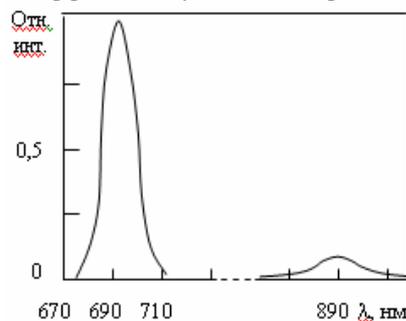


Рис. 4. Спектр ЭЛ ($T = 300^\circ\text{K}$, $I_{\text{пр}} = 2 \cdot 10^{-2}$ А)

Положение максимума излучения практически не зависело от величины тока в исследуемом интервале значений тока.

в) электрофизические свойства

1) вольтамперные

На типичной вольтамперной характеристике (ВАХ) (см. рис.5) наблюдаются четыре участка.

На первом участке (диапазон токов $10^{-6} - 10^{-4}$ А) зависимость носит экспоненциальный характер $I_{np} \sim \exp(eU_{np}/nkT)$, где показатель n находится в диапазоне 1,8 - 2,0 (e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – температура); на втором участке (диапазон токов $10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$ А) также наблюдается экспоненциальная зависимость с показателем экспоненты n в диапазоне 1,4 - 1,6. На третьем участке ВАХ (диапазон токов $5 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-1}$ А) зависимость носит степенной вид $I_{np} \sim U_{np}^\gamma$, где значение показателя γ близко к 4, и при увеличении тока от $2 \cdot 10^{-1}$ до $5 \cdot 10^{-1}$ А (четвертый участок) γ уменьшается до величины порядка 2. Переход от экспоненциального характера ВАХ к степенному происходит в диапазоне токов $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$ А. Значения постоянного прямого напряжения при токе $2 \cdot 10^{-2}$ А находятся в интервале 1,6 – 1,9 В (типовое значение 1,7 В).

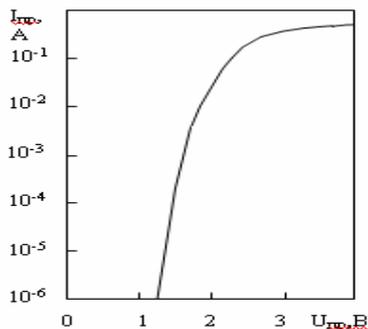


Рис. 5. Вольтамперная характеристика излучателей

2) вольтфарадные

Типичная вольтфарадная характеристика (ВФХ) излучателей, приведенная на рис. 6, описывается выражением: $C^2 = f(V)$, что свидетельствует о резком распределении примесей.

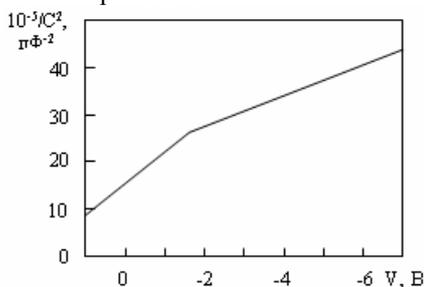


Рис. 6. Вольтфарадная характеристика излучателей

Емкость излучателя с площадью $p-n$ перехода $0,4 \times 0,4 \text{ мм}^2$ при нулевом смещении менялась в пределах $60 \div 130$ пф, и соответствующие толщины слоя объемного заряда составляли $(2,4 \div 1,2) \cdot 10^{-5}$ см.

3) ваттамперные

Типичная ваттамперная характеристика (рис. 7) имеет степенной характер - $P \sim I_{np}^\alpha$, где α -показатель характеристики. На ваттамперной характеристике

можно выделить три участка, на которых зависимость носит степенной характер.

На первом участке (в диапазоне токов $10^{-5} - 3 \cdot 10^{-5}$ А) значение α близко к 2, т.е. зависимость носит квадратичный характер; на втором участке (в диапазоне токов $10^{-4} - 10^{-3}$ А) значение α находится в пределах 1,5-1,6, т.е. зависимость носит сверхлинейный характер; на третьем участке (в диапазоне токов $2 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-1}$ А) значение $\alpha \approx 1$, т.е., зависимость носит линейный характер. Переход от квадратичного характера к сверхлинейному происходит в диапазоне токов $3 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ А, а от сверхлинейного характера к линейному - в диапазоне токов $10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ А. Значения мощности при токе $2 \cdot 10^{-2}$ А находятся в диапазоне $(1,1 - 2,0) \cdot 10^{-3}$ Вт, а при токе $5 \cdot 10^{-1}$ А – $(2,6 - 5,0) \cdot 10^{-2}$ Вт.

Значения внешнего квантового выхода излучательных элементов составляли 3,0 – 5,7%.

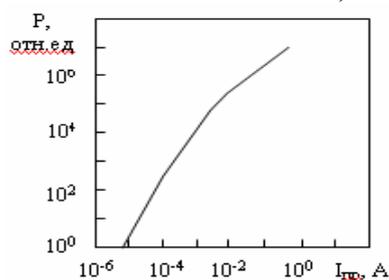


Рис. 7. Ваттамперная характеристика излучателей

4) быстроедействие

Типичная осциллограмма светового импульса излучателя приведена на рис. 8. Она характеризуется временами нарастания переднего фронта импульса в интервале $(2,5 - 3,0) \cdot 10^{-8}$ сек (без учета переходных характеристик измерительной установки).

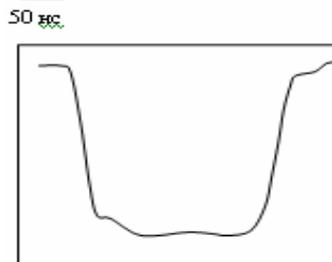


Рис. 8. Осциллограмма светового импульса излучателя

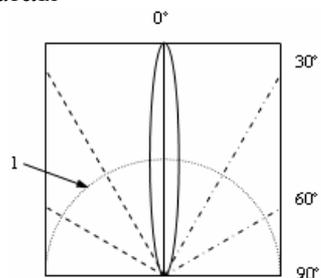


Рис. 9. Диаграмма направленности 1 - уровень 0,5 от максимальной интенсивности; 0°, ..., 90° - угол отклонения относительно конструктивной оси прибора

5) диаграмма направленности

Полуширина диаграммы направленности излучения разработанных излучателей (см. рис. 9) составляет 10 – 15 град.

Как видно, излучатели характеризуются достаточно узкой диаграммой направленности.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Схематическое изображение состава по толщине структур может быть представлено в виде, приведенном на рис. 10.

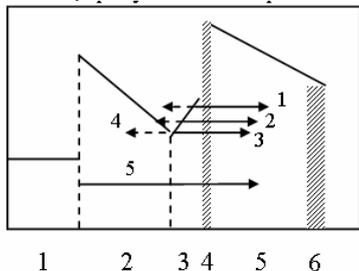


Рис. 10. Качественное изображение состава многослойной структуры 1 - p^+ -подложка GaAs, 2 - p -слой GaAlAs, 3 - p_a -активный слой с «обратным» распределением состава, 4 - i -инверсный (компенсированный) слой (заштриховано), 5 - n -слой GaAlAs, 6 - n^+ -слой GaAlAs (заштриховано)

Как было показано в [2], процесс роста второго p_a -слоя происходит при ограничении первого раствора-расплава, в результате чего происходит рост слоя с «обратным» распределением содержания Al по толщине. «Активный» тонкий p_a -слой между базовым p -слоем (толщиной порядка 20 мкм), и внешним световыводящим n -слоем (толщиной также порядка 20 мкм) и является основной областью излучения структуры. Как отмечалось, при набрасывании второго n -расплава на ограниченный слой p -расплава в эпитаксиальном n -слое может создаваться «тонкая» компенсированная область (4). Эта область получается в результате процессов взаимной диффузии компонент «ограниченного» слоя p -расплава и «неограниченного» n -расплава, в частности, имеет место компенсация Zn и Te, поэтому сложно говорить о ее типе проводимости. Целесообразно считать этот слой с инверсной проводимостью (толщина которого, по-видимому, незначительна вследствие достаточно быстрого перемешивания расплавов) и обозначить как i -слой. О его наличии может свидетельствовать излом, наблюдаемый на вольтфарадной характеристике (Рисунок 6). Состав этого слоя предполагается равным составу n -слоя. Исследование влияния i -слоя на излучательные характеристики не входило в задачи данной работы и заслуживает отдельного рассмотрения и анализа. О получении такого типа многослойных (трехслойных) структур красного цвета свечения на основе $Al_xGa_{1-x}As$ с «обратным» распределением по концентрации Al сообщается в работе [5], и также отмечается существенный рост внешнего квантового выхода. Однако согласно описанию способа получения этих структур [6] в технологическом процессе после наращивания 1-ого

слоя часть p -расплава смешивается с n -расплавом, после чего происходит наращивание n -слоя. Как было отмечено в [2], маловероятно, чтобы при таком способе происходил бы рост слоя с «обратным» распределением алюминия, при этом непосредственно в работе [6] не указывается о получении таких слоев.

Происходящие в активной области процессы излучения можно описать следующим образом. Доминирующим механизмом излучения в исследованных структурах является межзонная (квазимежзонная) излучательная рекомбинация носителей [7]. Инжектированные из n -области в p_a -слой электроны рекомбинируют с дырками, создавая фотоны типа 1 (см. рис. 10), распространяющиеся как в сторону n -слоя (и в дальнейшем во внешнюю среду), так и в обратную сторону (пунктиром). Эти фотоны поглощаются в активном слое, рождая пару электрон-дырка, которые в дальнейшем рекомбинируют, порождая, в свою очередь, в каждом последовательном акте поглощения фотоны типа 2, 3, т. е., происходит "переизлучение" фотонов с мало отличающейся друг от друга энергией. Далее фотоны типа 4 распространяются в сторону подложки, и здесь, поглощаясь, также переизлучаются (фотоны типа 5), создавая излучение, характерное для сильно легированного GaAs (что отражается в спектре электролюминесценции в виде полосы небольшой интенсивности в области 890 нм). Этот механизм излучения можно считать аналогичным описанному в работах [8, 9] процессу многократного прохождения и переизлучения света в многослойных гетероструктурах, приводящему к увеличению внешнего квантового выхода излучения. Анализ результатов, полученных при изучении вольтамперных характеристик, показывает, что механизм переноса носителей на участке токов $10^{-6} - 10^{-4}$ А, на котором значение показателя ВАХ близко к 2, определяется, в основном, рекомбинационными процессами в области объемного заряда. В диапазоне токов $10^{-4} - 10^{-3}$ А, на котором значение n составляет 1,5 - 1,7, токопрохождение обусловлено как рекомбинационными процессами в области объемного заряда, так и диффузией неосновных носителей через p - n переход с последующей их рекомбинацией с основными носителями. В области токов выше 10^{-3} А на форму вольтамперной характеристики начинают влиять сопротивления базовой области и металлических контактов кристаллов. Изменение положения максимума спектра излучения с температурой связывается с изменением ширины запрещенной зоны, и рассчитанный температурный коэффициент достаточно хорошо соответствует известным в литературе данным.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе проведенной работы показано, что использование метода комбинирования «неограниченного» и «ограниченного» объемов растворов-расплавов, предложенного на основе концепции моделей диффузии из *неограниченных* объемов растворов-расплавов («бесконечный

источник») и **ограниченных** объемов растворов-расплавов («конечный источник») перспективно для создания активных слоев с «обратным» распределением Al по толщине. Были получены излучательные структуры, на основе которых были изготовлены излучатели с эффективностью в несколько раз превышающие величины, полученные для структур с обычным распределением состава основных компонент. Вопрос детального рассмотрения механизмов образования активных слоев и их параметров вышеуказанным методом, несомненно, заслуживает дальнейших исследований.

-
- [1]. Берг А., Дин П. Светодиоды. М., «Мир», 1979.
- [2]. Бычкова Л.В., Джахуташвили Т.В., Тулашвили Э.В., Кекелидзе Н.П., Чармакадзе Р.А., Чиковани Р.И. Некоторые аспекты получения многослойных гетероструктур методом жидкофазной эпитаксии. Fizika-2005. The collection of works International Conference, 7-9 июня, 2005, Баку.
- [3]. Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. Москва, «Советское радио», 1975 г.
- [4]. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. М., «Мир», 1981.
- [5]. Бондарь С.А., Брагин Н.В., Галченков Д.В., Лебедев В.В., Сушков В.П. Переизлучающие гетерозпитаксиальные структуры $Al_xGa_{1-x}As$ для систем передачи и отображения информации. Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1980, вып. 3 (138), стр. 57 – 65.
- [6]. Брагин Н.В., Бондарь С.А., Галченков Д.В., Сушков В.П., Титова В.Ф. Влияние технологии выращивания гетероструктур в системе GaAs – AlAs на некоторые характеристики светоизлучающих диодов. Электронная Техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1974, вып. 10 (92), стр. 31 – 38.
- [7]. Алферов Ж.И., Гарбузов Д.З., Колышкин В.И., Нинуа О.А., Трофим В.Г. Рекомбинационное излучение твердых растворов арсенид алюминия – арсенид галлия, легированных цинком. ФТП, 1971, т. 5, вып. 7, стр. 1405 – 1408.
- [8]. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Гарбузов Д.З., Давидюк Н.Ю., Ларионов В.Р., Марахонов В.М., Смирнова Е.К., Шелованова Г.Н. Мощные светодиоды с двумя гетеропереходами в системе AlAs – GaAs. ЖТФ, 1975, т. XLV, вып. 2, стр. 374 – 381.
- [9]. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Гарбузов Д.З., Давидюк Н.Ю., Ларионов В.Р., Румянцев В. Д. Высокоэффективный быстродействующий гетеросветодиод. ФТП, 1975, т. 9, вып. 7, стр. 1265 – 1270.
- [10].