

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**
Институт прикладной математики, физики и информатики
Кафедра физики и прикладной математики

Давыдов Николай Николаевич
Аракелян Сергей Мартиросович

Методические указания к практическим занятиям
по дисциплине
"Проектирование электронных модулей управления лазерными системами"

для студентов ВлГУ, обучающихся по направлению
12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии»

Владимир-2016 г.

Содержание

ТЕМА 1. Полупроводниковая накачка твердотельных лазерных систем и их разновидности.....	3
ТЕМА 2. Источники вторичного питания систем накачки	6
ТЕМА 3. Технологии создания узлов полупроводниковой накачки.....	11
ТЕМА 4. Типы твердотельных активных лазерных сред	18
Список литературы	22

ТЕМА 1. Полупроводниковая накачка твердотельных лазерных систем и их разновидности

Основные вопросы темы: функциональные элементы лазерных систем — активная среда, система накачки, оптический резонатор, источник вторичного электропитания, система термостабилизации, система управления. Типы твердотельных лазерных систем (ТТЛ) – по выходному излучению: моноимпульсные, квазинепрерывные (импульсно-периодические) и непрерывные; по виду активной лазерной среды: фосфатное стекло, монокристалл, керамика и оптическое волокно, их преимущества и недостатки. Построение функциональных схем ТТЛ.

Цель и задачи практического занятия состоят в ознакомлении студента с принципиальной конструкцией ТТЛ, их ключевыми компонентами и вариантами взаимного расположения.

Основной понятийно-терминологический аппарат: активная среда, оптическая накачка, линейка лазерных диодов, когерентная/некогерентная накачка, эффективность накачки, квантовый оптический генератор, оптический резонатор.

Требования к уровню подготовленности студента. Студент должен разбираться в принципах функционирования основных схем, узлов и компонентов лазерных систем и систем управления, их назначении, иметь базовые представления о законах распространения оптических пучков, быть готовым перечислить и описать назначение ключевых компонентов ТТЛ, назвать тип ТТЛ на основе расположения и вида его компонентов, построить функциональную схему ТТЛ.

Краткий теоретический материал по теме 1

Одним из условий достижения высокой эффективности ТТЛ является наличие полупроводниковой накачки лазерных кристаллов твердотельных лазеров. Обеспечение точного совмещения узкого пика спектра излучения лазерного диода накачки с полосой поглощения спектра активного элемента позволяет минимизировать тепловые и безизлучательные потери. При изменении температуры лазерного диода происходит дрейф максимума спектра его излучения, что приводит к снижению эффективности накачки. Температурное смещение составляет величину $2,5-3 \text{ \AA}/\text{K}$, поэтому для достижения максимальной эффективности накачки требуется поддержание рабочей температуры лазерного диода (термостабилизация) в достаточно узких пределах. Максимальное значение коэффициента преобразования электрической энергии в излучение лазерных диодов составляет величину от 50 % для квазинепрерывных, до 40 % - для непрерывных диодов.

Известны схемы оптической полупроводниковой накачки активных лазерных сред: поперечная и продольная. В случае мощных лазерных систем обычно применяют первую. Следует отметить, при этом стремятся увеличить однородность и плотность накачки активной лазерной среды, длину оптического пути стимулированного излучения и минимизировать габаритные размеры активной среды. Одним из решений столь противоречивых требований является схема «Зиг-Заг», на рисунке 1.

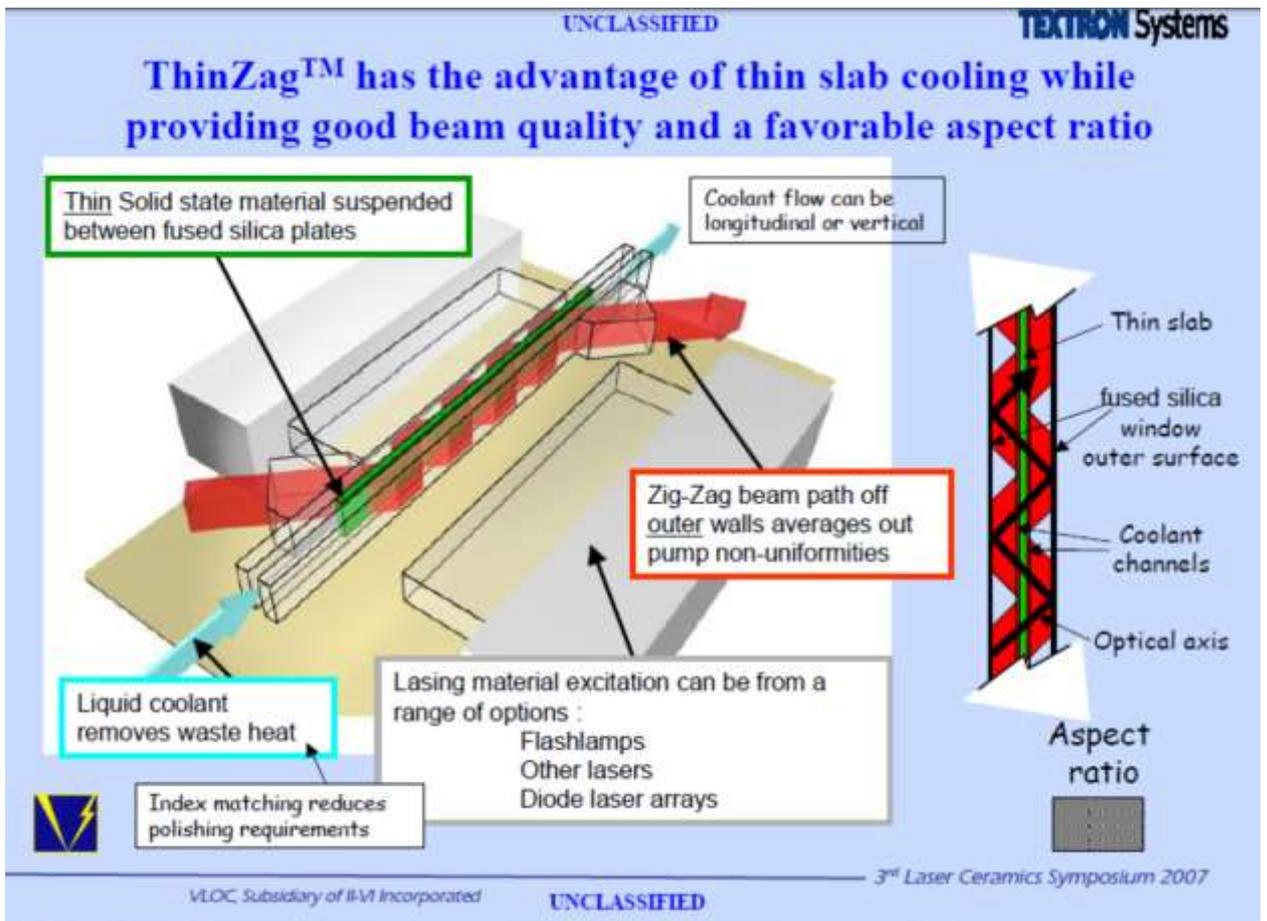


Рисунок 1. Оптическая схема «Зиг-Заг».

Именно с помощью такой схемы американская корпорация TEXTRON, разработала ТТЛ непрерывного режима работы с выходной мощностью более 10 кВт.

Задание: подготовить краткое сообщение и построить функциональную схему излучателя с различными видами полупроводниковой накачки (квазинепрерывной, непрерывной, импульсной).

Выполнение: осуществляется на основе анализа литературных источников по тематике «Твердотельные лазеры с диодной накачкой».

ТЕМА 2. Источники вторичного питания систем накачки

Основные вопросы темы: общие технические и эксплуатационные требования к источникам питания линеек лазерных диодов, обобщенная системная модель конструкции источника вторичного питания (ИВП), разновидности компоновки. Конструкционные решения и конкретные технические примеры ИВП лазерных систем.

Цель и задачи изучения темы состоят в изучении конкретных способов реализации отдельных узлов и схем ИВП, пониманию влияния конструкции приборов на их функциональные характеристики, а также на работоспособность других компонентов электронных модулей управления (ЭМУ), развитию конструкторских навыков.

Основной понятийно-терминологический аппарат: операционный усилитель, широтно-импульсная модуляция, аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователь, вторичный источник питания, «драйвер» питания.

Требования к уровню подготовленности студента – студент должен разбираться в функциональном назначении узлов ЭМУ, уметь проводить расчеты электрических схем, описывающих прохождение электрических сигналов в цепях ЭМУ.

Краткий теоретический материал по теме 2

Рассчитываем дроссель (индуктивность) для схемы заряда емкости, питающей решетку лазерных диодов в импульсно периодическом режиме, рисунок 2.

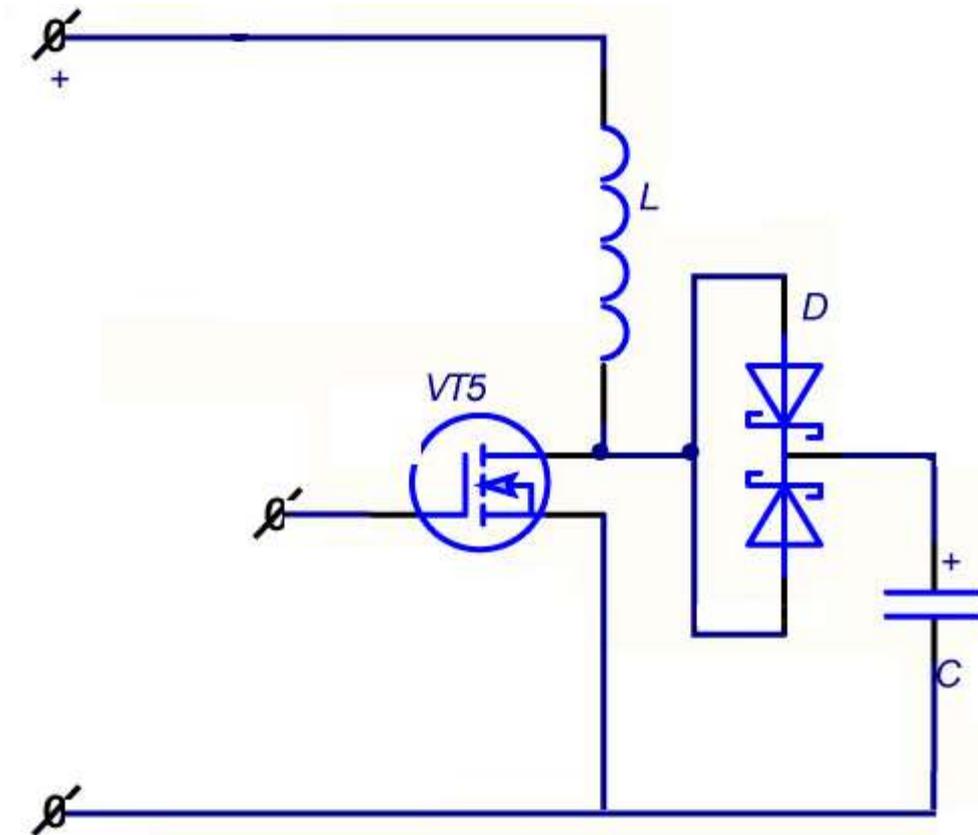


Рисунок2. Электрическая схема заряда емкости.

Переменные:

I - ток индуктивности,

I_{\max} - максимальный импульсный ток ключевого транзистора,

U - напряжение источника питания,

L - индуктивность,

l - длина катушки по средней линии,

τ - время "разгона" индуктивности,

W - энергия, запасенная в индуктивности при разгоне,

N - число витков индуктивности,

S - сечение магнитопровода индуктивности,

B - максимальная магнитная индукция магнитопровода,
 F - частота следования импульсов зарядки,
 C - заряжаемая емкость,
 ΔU - изменение напряжения в процессе разряда емкости на полезную нагрузку,
 U_0 - рабочее напряжение на конденсаторе,
 $\tau_{\text{РЛД}}$ - длительность импульса в процессе разряда емкости на полезную нагрузку,
 $I_{\text{РЛД}}$ - ток в процессе разряда емкости на полезную нагрузку,
 $T_{\text{РЛД}}$ - период следования импульсов РЛД,
 H_C - коэрцитивная сила магнетика..

"Разгонный" ток индуктивности определяется из уравнения

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

и равен:

$$I = \frac{U \cdot \tau}{L} \quad (2)$$

Энергия запасенная в индуктивности в процессе "разгона" с учетом выражения (2):

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2} = \frac{U^2 \cdot \tau^2}{2 \cdot L} \quad (3)$$

Для эффективной зарядки емкости C энергия W должна быть как можно больше, соответственно из (3) ток, время "разгона" больше, индуктивность меньше. Ток ограничен максимальным током выбранного ключевого транзистора, длительность "разгона" ограничена индукцией насыщения материала сердечника. Из (2) находим минимальную допустимую индуктивность:

$$L = \frac{U \cdot \tau}{I_{\text{max}}} \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получаем:

$$W = \frac{U \cdot \tau \cdot I_{\max}}{2} \quad (5)$$

Второе ограничение получаем из уравнения для электромагнитной эдс:

$$U = N \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} = \frac{N \cdot S \cdot B}{\tau} \quad (6)$$

Подставив (6) в (5) получим:

$$W = \frac{N \cdot S \cdot B \cdot I_{\max}}{2} \quad (7)$$

Подставив (6) в (4) получим:

$$L = \frac{N \cdot S \cdot B}{I_{\max}} \quad (8)$$

Частота следования импульсов. Время τ - "разгон" индуктивности и еще τ - передача энергии от индуктивности к емкости, поэтому из (6) получаем:

$$F = \frac{1}{2\tau} = \frac{U}{2 \cdot N \cdot S \cdot B} \quad (9)$$

Средняя мощность накачки емкости:

$$P = W \cdot F = \frac{N \cdot S \cdot B \cdot I_{\max}}{2} \cdot \frac{U}{2 \cdot N \cdot S \cdot B} = \frac{U \cdot I_{\max}}{4} \quad (10)$$

Средняя мощность, отбираемая с емкости:

$$P_{РЛД} = \frac{I_{РЛД} \cdot U_0 \cdot \tau_{РЛД}}{T_{РЛД}} \quad (11)$$

Для поддержания стационарного состояния мощность накачки емкости должна равняться отбираемой мощности:

$$\frac{I_{\max} \cdot U}{4} = \frac{I_{РЛД} \cdot U_0 \cdot \tau_{РЛД}}{T_{РЛД}} \quad (12)$$

Правая часть (12) является параметрами нагрузки, а потому от нас не зависит, а задается заказчиком. Напряжения питания преобразователя U , также является внешним параметром. Таким образом, уравнение (12) определяет минимальный импульсный ток ключевого транзистора или ток до которого должна "разгоняться" индуктивность.

$$I_{\max} = 4 \cdot I_{РЛД} \cdot \frac{U_0 \cdot \tau_{РЛД}}{U \cdot T_{РЛД}} \quad (13)$$

Индуктивность катушки равна:

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l} \quad (14)$$

Сравнивая с (8), получим:

$$\mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} = \frac{B}{I_{\max}} \quad \text{или} \quad \frac{N}{l} = \frac{B}{\mu \cdot \mu_0 \cdot I_{\max}} \quad (15)$$

Из (6) получаем:

$$\tau = \frac{N \cdot S \cdot B}{U} \quad \text{или} \quad N \cdot S = \frac{\tau \cdot U}{B} \quad (16)$$

Разделив (16) на (15), получим:

$$l \cdot S = V = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{\tau \cdot U \cdot I_{\max}}{B^2} \quad \text{или}$$

$$\frac{V \cdot B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} = \frac{\tau \cdot U \cdot I_{\max}}{2} = W \quad (17)$$

В выражении (17) слева энергия запасенная в магнитопроводе, справа энергия запасаемая в одном импульсе в индуктивности. Это выражение показывает физическую основу запасаемой в индуктивности энергии. Чем больше длительность импульса "разгона" индуктивности, тем больший объем V магнитной среды требуется, соответственно и большая энергия в импульсе запасается.

Задание: рассчитать значения индуктивности устройства заряда. Значения переменных и справочные данные выдаются индивидуально студенту.

Выполнение: Провести расчет по приведенной методике.

ТЕМА 3. Технологии создания узлов полупроводниковой накачки

Основные вопросы темы: типы, особенности конструкции и основные характеристики узлов полупроводниковой накачки. Технологии роста гетероструктур лазерных диодов.

Цель и задачи изучения темы состоят в изучении конкретных способов реализации отдельных узлов лазерных систем, технологий изготовления лазерных диодов.

Основной понятийно-терминологический аппарат: МОС-гидридная технология, элемент Пельтье, жидкостное охлаждение, кондуктивное охлаждение.

Требования к уровню подготовленности студента – студент должен разбираться в функциональном назначении узлов, ориентироваться в основных вопросах/понятиях темы, понимать логические связи между ними.

Краткий теоретический материал по теме 3

Технология МОС-гидридной эпитаксии основана на подаче в ростовую зону исходных компонентов эпитаксиальных слоев в виде легколетучих простых веществ или соединений в потоке газа-носителя (H_2). В реакторе происходят реакции пиролиза легколетучих металлоорганических соединений, стимулированные термическим или иным путем. При этом требуемые компоненты с последующей химической реакцией осаждаются на нагретую подложку, являющуюся основой полупроводникового прибора. В аппаратном оформлении МОС - гидридная технология подобна газофазной эпитаксии пленок кремния, где контролируются парциальные давления реагентов и температура подложки.

МОС – гидридная технология позволяет получать монокристаллические слои AlGaAs, InGaAs и всевозможные их комбинации, предназначенные для создания полупроводниковых приборов на основе соединений $A_{III}B_V$, а также получать квантовые ямы, квантовые точки и дельта слои примеси. Управляя параметрами роста, можно создавать комбинации слоев $A_{III}B_V$ с различными параметрами по легированию. Выращенные структуры используются для производства различных полупроводниковых приборов: полупроводниковые высокоомощные и одномодовые лазеры (длины волн излучения от 600 до 1700 нм), фотоприемники высокой чувствительности на различные диапазоны длин волн, фотокатоды, солнечные элементы с высоким коэффициентом преобразования, приборы высокочастотной техники. Для роста соединений $A_{III}B_V$ вместо металлоорганических соединений элементов пятой группы могут использоваться гидриды соответствующих элементов.

Некоторые гидриды: AsH_3 – арсин, и металлоорганические соединения: $Ga(CH_3)_3$ – триметилгаллий (ТМГ), $Ga(C_2H_5)_3$ – триэтилгаллий (ТЭГ), $In(CH_3)_3$ – триметилиндий (ТМИ), $In(C_2H_5)_3$ – триэтилиндий (ТЭИ), $Al(CH_3)_3$

– триметилалюминий (ТМА) (в общем виде – MR_3 , где М – металл, R_3 – (CH_3) или (C_2H_5) – алкил).

Схематическое описание процессов при МОС-гидридной эпитаксии показано на рисунке 3.

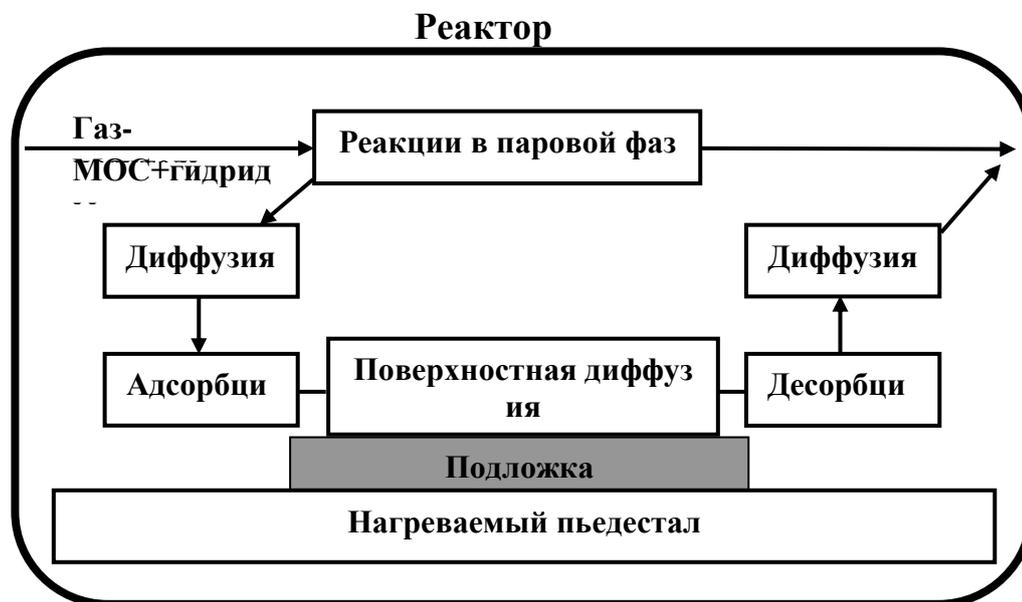


Рисунок 3 - Процессы в реакторе установки МОС-гидридной эпитаксии

Реакция происходит в газовом потоке при атмосферном или пониженном давлении в реакторе с холодными стенками. Газом-носителем обычно является водород. Отдельные стадии полной реакции имеют место уже в газовой фазе. Заключительные стадии и встраивание в решетку происходят на поверхности полупроводника. Типичные реакторы позволяют подключать несколько металлоорганических и гидридных источников, поэтому в едином ростовом цикле могут быть последовательно выращены чередующиеся слои разных материалов. Это дает возможность получать многослойные многокомпонентные эпитаксиальные структуры, в том числе сверхрешетки.

В технологическом процессе эпитаксии из металлоорганических соединений не участвуют травящие вещества, процесс роста при этом не является результатом конкуренции между осаждением и травлением, как в некоторых других методах эпитаксии из парогазовой фазы. Как следствие,

обеспечиваются резкие границы между слоями, однородность растущих слоев по толщине и составу.

Типичная система эпитаксиального роста (рисунок 4) состоит из трех главных частей – газораспределительной системы, реактора и системы удаления непрореагировавших газов и продуктов реакции.

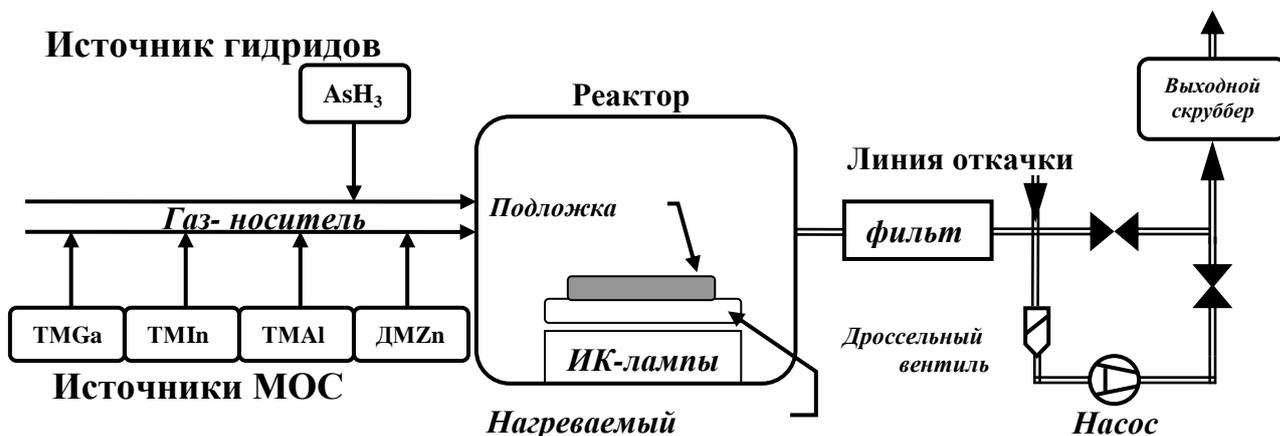


Рисунок 4 - Схематическое изображение установки МОС-гидридной эпитаксии

Металлоорганические соединения, представляющие интерес для выращивания полупроводниковых слоев, при комнатной температуре в большинстве своем являются жидкостями (триметилгаллий (ТМГ), триэтилгаллий (ТЭГ), триметилалюминий (ТМА), диметилцинк (ДМЦ)), хотя некоторые из них при этой и даже более высокой температуре остаются твердыми (триметилиндий (ТМИ)). Эти вещества обычно имеют довольно высокое давление паров и легко могут быть доставлены в зону роста путем пропускания газа-носителя через жидкость или над твердым телом. В качестве газа-носителя обычно используется чистый водород или смесь водорода с азотом. Металлоорганические соединения помещаются в металлические контейнеры-испарители, которые поддерживаются при строго определенных температурах, например, ТЭГ при $0\text{ }^{\circ}C$, ТЭИ – при $30\text{ }^{\circ}C$. Через испарители пропускается водород, очищенный диффузией через палладиевый фильтр. Расходы поддерживаются регуляторами расхода газа.

Гидриды в основном используют в виде 10%-ной смеси с водородом, иногда – неразбавленные.

Достаточно широкое распространение получил метод роста из металлоорганических соединений при пониженном давлении. Метод обеспечивает следующие преимущества:

- подавляется гомогенная реакция в газовой фазе, так как снижается температура газового потока;

- высокие скорости газовых потоков обеспечивают получение более однородных по составу и толщине слоев, поскольку рост происходит в диффузионном режиме;

- быстрый газообмен в зоне роста облегчает получение резких гетерограниц;

- скорость роста контролируется только массопереносом, что гарантирует получение зеркально-гладких поверхностей;

- не наблюдается автолегирования, что очень важно для получения резких гетеропереходов.

Существуют разнообразные конструкции реакторов. Для научных исследований и малотиражного производства обычно используются горизонтальные реакторы, рассчитанные на работу с одной пластиной диаметром до 100 мм. Наиболее распространены реакторы, рассчитанные для работы с пластиной диаметром 52 мм. Основная особенность реакторов такого типа – это то, что в них регулируется только температура подложкодержателя, нагреваемого инфракрасными лампами или индуктивно. Температура стенок реактора не регулируется.

Еще один тип реактора – планетарный. В этом реакторе исходные материалы вводятся в центре радиально-симметрического реактора и растекаются к его периферии. Для компенсации эффектов, обусловленных радиальным распространением газа, используется вращение всего подложкодержателя и индивидуальное вращение каждой пластины. Это приводит к планетарному движению подложек. Температура верхней части

кварцевого реактора, находящейся приблизительно на 20 мм выше подложек, активно управляется охлаждающей газовой смесью. В этот реактор, в зависимости от его диаметра, загружается одновременно от пяти пластин диаметром 150 мм до ста пластин диаметром 52 мм.

Каждая из приведенных геометрий реактора требует оптимизации конфигурации растекания парогазовой смеси и температурного поля в реакторе. Для оптимизации геометрии реактора применяется численное моделирование. Это обеспечивает превосходную однородность состава по площади пластины, а также от одной пластины к другой.

Непосредственно после реактора следует система откачки, которая состоит из роторного насоса, вентиля для контроля давления и ловушки для конденсирующихся материалов. На выходе из насоса газовый поток обрабатывается во влажном или сухом химическом скруббере или проходит через горелку для удаления основной доли ядовитых материалов. Обработка выходящих газов особенно неприятна в случае выращивания материалов, содержащих большие количества фосфора, вследствие склонности фосфора к самовоспламенению. Для облегчения конденсации фосфора могут использоваться охлаждаемые ловушки. Обычно применяется намеренное окисление фосфора после каждых нескольких циклов роста, чтобы предотвратить его накопление в больших количествах.

Современные требования к установкам МОС-гидридной эпитаксии: минимальный объем реактора, отсутствие непродуваемых карманов; скорость натекания элементов газораспределительной системы не более $4 \cdot 10^{-11}$ Па/с; точность поддержания потоков, проходящих через испарители, в пределах 0,25 %; точность поддержания температуры испарителей $\pm 0,25^\circ\text{C}$. Количество кислорода и воды в транспортирующих газах должно поддерживаться на уровне меньше 0,01 частей на миллион (точка росы 78°C). Для этого используют загрузку подложек через шлюзовое устройство, исключая контакт реактора и подложкодержателя с атмосферой, размещение всей газораспределительной системы в вакуумной камере и др.

Очищается реактор газовым травлением в AsCl_3 , PCl_3 или HCl без разгерметизации системы.

Задание: подготовить краткое сообщение по современным технологиям используемым при производстве линеек лазерных диодов (ростовым и постростовым технологиям). Тема сообщения выдается индивидуально.

Выполнение: осуществляется на основе анализа литературных источников по тематике «Твердотельные лазеры с диодной накачкой».

ТЕМА 4. Типы твердотельных активных лазерных сред

Основные вопросы темы:

Разновидности активных лазерных сред (АЛС). Структурные и эксплуатационные характеристики твердотельных АЛС. Энергетические соотношения для активных лазерных элементов.

Цель и задачи изучения темы. Ознакомление с типами твердотельных активных сред. Студент должен ознакомиться с основными принципами выбора АЛС с учетом функциональных и конструктивных особенностей последних, научиться разбираться в технических аспектах конструирования квантовых генераторов и компонентов ЭМУ.

Основной понятийно-терминологический аппарат: ватт-амперные и характеристики, эффективность преобразования накачки, квантовый КПД, волоконно-оптические линии.

Требования к уровню подготовленности студента – студент должен иметь базовые представления о принципах работы основных компонентов лазерных систем, понимать назначение систем квантового генератора и основные требования к ним.

Краткий теоретический материал по теме 4

Проведем расчет интенсивности накачки, для активного элемента в форме бруска, из алюмоиттриевого граната с неодимом. Считаем, что нижний лазерный уровень распадается быстро, а потому число таких состояний будем считать равным нулю. В этом случае динамика верхнего уровня будет описываться следующим уравнением:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{\sigma \cdot I}{h\nu} \cdot N_2 - \frac{N_2}{\tau} + \frac{P}{h\nu_n} = -\left(\frac{\sigma \cdot I}{h\nu} + \frac{1}{\tau}\right) \cdot N_2 + \frac{P}{h\nu_n} \quad (1)$$

Первый член в правой части описывает скорость индуцированных переходов, второй - скорость спонтанных переходов, третий - скорость накачки. $N_2, \sigma, h\nu, I, \tau, P, h\nu_n$ - плотность верхнего лазерного уровня, сечение лазерного перехода, энергия кванта излучения, плотность потока излучения, время жизни верхнего уровня, мощность накачки, энергия кванта накачки.

Следующее уравнение описывает динамику числа фотонов в лазерном объеме

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\sigma \cdot I}{h\nu} \cdot V \cdot N_2 - \left(\frac{1}{\tau_\phi} + \kappa \cdot \delta \cdot \frac{c}{n}\right) \cdot q, \quad (2)$$

$q, V, \tau_\phi, c, \kappa, n, \delta$ - число фотонов в объеме резонатора, объем активной среды, время жизни фотона в резонаторе, скорость света в вакууме, коэффициент поглощения света на длине волны излучения, коэффициент преломления активной среды, доля времени когда фотон находится в активной среде.

Свяжем плотность потока излучения в резонаторе с числом фотонов в резонаторе. Плотность потока вне активной среды:

$$I = \frac{q_1 \cdot c \cdot h\nu}{V_p - V}, \quad (3)$$

где V_p - объем резонатора, q_1 - число фотонов вне активной среды.

Плотность потока в активной среде и вне неё считаем одинаковыми. Плотность потока в активной среде:

$$I = \frac{q_2 \cdot c \cdot h\nu}{n \cdot V}, \quad (4)$$

где q_2 - число фотонов в активной среде.

Приравнявая (3) и (4) и учитывая, что суммарное число фотонов в резонаторе равно q , то

$$\frac{(q - q_1)}{L \cdot n} = \frac{q_1}{L_p - L}, \quad (5)$$

где S, L, L_p - сечение светового пучка, длина активной среды, длина резонатора. Тогда число фотонов вне активной среды

$$q_1 = \frac{q \cdot (L_p - L)}{(L_p + L \cdot (n - 1))}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3) получим уравнение связи общего числа фотонов и плотности потока излучения.

$$I = \frac{q \cdot c \cdot h\nu}{S \cdot (L_p + L \cdot (n - 1))}. \quad (7)$$

Следовательно, в стационарном состоянии, плотность верхнего лазерного уровня равна:

$$N_2 = \left(\frac{1}{\tau_\phi} + \kappa \cdot \delta \cdot \frac{c}{n} \right) \cdot \frac{(L_p + L \cdot (n - 1))}{\sigma \cdot c \cdot L}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (1) и находя его стационарное решение, получим уравнение для плотности потока лазерного излучения.

$$I = \frac{h\nu}{h\nu_n} \cdot \frac{c \cdot L \cdot P}{(L_p + L \cdot (n - 1)) \cdot \left(\frac{1}{\tau_\phi} + \kappa \cdot \delta \cdot \frac{c}{n} \right)} - \frac{h\nu}{\sigma \cdot \tau}. \quad (9)$$

Время жизни фотона в резонаторе определяется временем пробега фотона по резонатору туда и обратно в случае, когда одно зеркало имеет 100 % отражение, и коэффициентом отражения R второго зеркала.

$$\tau_\phi = 2 \cdot \frac{L_p + (n - 1) \cdot L}{c \cdot \ln(1/R)} \quad (10)$$

В конечном итоге плотность потока лазерного излучения будет равна:

$$I = \frac{h\nu}{h\nu_n} \cdot \frac{2 \cdot L \cdot P}{\left(\ln(1/R) + 2 \cdot (L_p + L \cdot (n-1)) \cdot \delta \cdot \frac{\kappa}{n} \right)} - \frac{h\nu}{\sigma \cdot \tau} \quad (11)$$

Пороговую мощность определим из условия, что $I > 0$.

$$P_{II} = \frac{h\nu_n}{\sigma \cdot \tau} \cdot \frac{\ln(1/R) + 2 \cdot (L_p + L \cdot (n-1)) \cdot \frac{\delta \cdot \kappa}{n}}{2 \cdot L}, \quad (12)$$

где $\delta = \frac{L \cdot n}{L_p + (n-1) \cdot L}$.

В итоге получим зависимость потока мощности излучения от потока мощности накачки:

$$I = \frac{h\nu}{h\nu_n} \cdot \frac{2 \cdot L \cdot P}{(\ln(1/R) + 2 \cdot L \cdot \kappa)} - \frac{h\nu}{\sigma \cdot \tau}. \quad (13)$$

Задание: рассчитать значения потока мощности излучения от потока мощности накачки. Значения переменных и справочные данные выдаются индивидуально студенту.

Выполнение: Провести расчет по приведенной методике.

Список литературы

[1] Шеин, А.Б. Методы проектирования электронных устройств [Электронный ресурс] / А. Б. Шеин, Н. М. Лазарева. - М.: Инфра-Инженерия, 2011.- 456 с. – Режим доступа:

<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=520288;264> с.

[2] Панков, Л. Н. Основы проектирования электронных средств [Электронный ресурс]: Учеб. пособие / Л. Н. Панков, В. Р. Асланянц, Г. Ф. Долгов, В. В. Евграфов; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 260 с. — Режим доступа:

<http://e.lib.vlsu.ru/bitstream/123456789/1124/3/00537.pdf>.

[3] Борн М. Вольф Э. Основы оптики: Пер. с англ. / Под ред. Г.П. Мотулевич. — М.: Наука, 1973. — 720 с.

[4] Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 320 с.

[5] Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990.

[6] Шайдуров, Г. Я. Основы теории и проектирования радиотехнических систем [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Г. Я. Шайдуров. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. - 283 с. – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=441951>.

[7] Основы автоматизированного проектирования: Учебник/Под ред. А.П.Карпенко - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 329 с.: Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=477218>

[8] Малков, Н.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств : учеб. пособие / Н.А. Малков, А.П. Пудовкин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 88 с.