

6
A-59

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ИНСТИТУТ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Ю. А. БАЛОШИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНОМ ОКГ
НА CO₂ С РЕЗОНАТОРАМИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ**

Специальность 05.296 — Электронная техника и приборы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1971

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ИНСТИТУТ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Ю. А. БАЛОШИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНОМ ОКГ
НА CO_2 С РЕЗОНАТОРАМИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Специальность 05.296 — Электронная техника и приборы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛЕНИНГРАД
1971



Работа выполнена на кафедре квантовой радиоэлектроники Ленинградского института точной механики и оптики.

Научный руководитель — кандидат физико-математических наук, доцент А. С. ТЕР-ПОГОСЯН.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Е. И. ХЛЫПАЛО.

кандидат технических наук, доцент К. Н. ЩЕЛКУНОВ.

Ведущее предприятие — Ленинградское оптико-механическое объединение.

Автореферат разослан «*11*» *мая* 1971 г.

Защита диссертации состоится «*15*» *июня* 1971 г. на заседании Совета факультета оптико-электронного приборостроения Ленинградского института точной механики и оптики (Ленинград, Центр, ул. Саблинская, 14).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ваши отзывы и замечания по автореферату (в 2-х экз.) просим направлять в адрес института.

Ученый секретарь Совета факультета оптико-электронного приборостроения кандидат технических наук (А. В. УШАКОВ)

Газовые лазеры представляют собой, пожалуй, наиболее широко используемый в настоящее время тип квантовых генераторов и, возможно, в этом отношении они превосходят даже твердотельные ОКГ. Наиболее важным за последнее время достижением в области газовых лазеров явилось открытие Пателом генерации вынужденного излучения в CO_2 на полосе $10,6 \text{ мк}$ с высоким к. п. д. Выходная мощность в ОКГ на основе CO_2 в непрерывном режиме работы доведена в настоящее время до нескольких киловатт.

Одновременно с непрерывным режимом в ОКГ на CO_2 была получена импульсная генерация. Работы по исследованию и созданию импульсных ОКГ на CO_2 весьма актуальны в настоящее время, ибо эти лазеры обладают рядом свойств, которые уже сейчас могут обеспечить им широкое применение в науке и технике. Расширение области применения этих приборов зависит в первую очередь от уровня выходной мощности. Увеличение выходной мощности импульсных ОКГ на CO_2 — вот основная задача, стоящая сейчас перед исследователями. В последнее время появился ряд работ, в которых эта проблема принципиально решается за счет увеличения давления активной смеси в трубке вплоть до атмосферного с применением поперечного разряда и одновременного продува. На таких ОКГ были достигнуты мощности и энергии в импульсе, соизмеримые уже с излучением твердотельных лазеров (единицы — десятки мегаватт и единицы джоулей). Однако при этом возникли дополнительно новые проблемы, которые в настоящее время ждут своего решения.

Недостаточно изучен и механизм работы импульсного ОКГ на CO_2 при сравнительно малых давлениях активной смеси и продольном разряде. На сегодняшний день можно смело сказать, что работ по вопросам импульсной генерации в ОКГ на CO_2 явно недостаточно.

В литературе имеется очень мало данных по измерениям выходной мощности, энергии, коэффициента усиления в раз-

личных по составу активных смесей и их зависимостей от условий возбуждения. Отсутствуют какие-либо данные о влиянии резонатора на процессы, происходящие в активной среде CO_2 -лазера, работающего в импульсном режиме, хотя резонатор, как один из основных элементов генератора, во многом может определить уровень его выходной мощности и другие важные характеристики излучения (длительность импульса генерации, расходимость, распределение поля излучения и т. д.).

Целью реферируемой диссертационной работы явилось:

1) теоретическое и экспериментальное исследование режима генерации в импульсном ОКГ на CO_2 , активная смесь которого возбуждается короткими (единицы микросекунд) одиночными и следующими с частотой $f=50$ гц импульсами тока при различных парциальных давлениях CO_2 , N_2 и He ;

2) исследование влияния резонаторных систем различной геометрии с отверстиями связи на основные параметры генерации ОКГ на CO_2 (пиковую мощность, энергию, развитие и длительность импульса генерации) с точки зрения оптимизации параметров резонатора для получения максимальной мощности и энергии в импульсе для исследуемого режима, при различных парциальных давлениях газов активной смеси;

3) разработка на основе полученных результатов макета технологической установки для обработки хрупких материалов, широко используемых в микроэлектронике (стекло, керамика, ферриты и т. д.).

Диссертация состоит из введения, трех глав, приложения и заключения.

Первая глава посвящена теоретическому анализу работы импульсного ОКГ на CO_2 .

В настоящее время существует достаточно обоснованное качественное объяснение механизма работы ОКГ на CO_2 [1], получившее хорошее подтверждение в большом количестве экспериментальных работ. Однако количественный анализ процессов в ОКГ на CO_2 , определяющий основные параметры генерации, представляет собой довольно сложную задачу. На сегодняшний день системы уравнений, наиболее полно отражающей все элементарные процессы в смеси CO_2 — He — N_2 , помещенной в резонатор с произвольными параметрами и находящейся под действием возбуждения (импульсного или непрерывного), не существует. По имеющимся в литературе данным режим генерации в импульсном ОКГ на CO_2 можно представить упрощенной системой уравнений. Эта система включает в себя уравнения, описывающие:

а) изменение инверсии под действием импульса разрядного тока [2];

б) изменение плотности и температуры электронов (по упрощенной схеме [2]);

в) уравнение, описывающее изменение плотности мощности излучения;

г) нестационарное уравнение теплопроводности.

Система должна замыкаться уравнением, связывающим скорость создания инверсии с параметрами резонатора.

В ОКГ на CO_2 используются два типа резонаторов:

1) резонатор, образованный зеркалами, одно из которых изготовлено из материала, прозрачного для длин волн генерации CO_2 -лазера (9—11 мк), с нанесенной на него пленкой с коэффициентом отражения R в области $9-11 \text{ мк} < 1$ (так называемое «полупрозрачное» зеркало), а другое, из того же материала, имеет в этой области очень большое R («глухое» зеркало);

2) резонатор с зеркалами, имеющими очень высокое отражение для 9—11 мк (пленка Al , нанесенная на стеклянную подложку, имеет $R \approx 96-97\%$), и с отверстием связи в одном из зеркал, через которое осуществляется вывод энергии из резонатора.

В этой работе все эксперименты проводились на CO_2 -лазере с резонаторами второго типа. Этот выбор определился следующими соображениями.

Во-первых, в литературе практически нет работ, посвященных подробному исследованию ОКГ на CO_2 (в импульсном и непрерывном режимах) с резонаторами второго типа, хотя работ по расчету «пустых» резонаторов с отверстиями связи появилось в настоящее время довольно большое количество.

Во-вторых, большинство материалов, прозрачных в ИК-области, имеют достаточно большое поглощение в области 9—11 мк и поэтому выбор материалов, пригодных для подложек зеркал и их покрытий, весьма ограничен. Кроме того, полупрозрачные зеркала дороги в производстве. Зеркала с отверстиями связи имеют ряд преимуществ перед «полупрозрачными» зеркалами. Применение обычного оптического стекла (типа К-8) или металла (стали, сплава) в качестве материалов подложек значительно удешевляет и упрощает изготовление самих зеркал. В таких зеркалах можно конструктивно осуществить принудительное охлаждение, а подбором материала подложки и отражающего покрытия можно добиться очень высокого коэффициента отражения. Это повышает стойкость таких зеркал

в режимах больших мощностей генерации. Такое зеркало, даже если оно вышло из строя (выгорание, выколки, царапины), можно быстрее и с меньшими затратами восстановить, нежели полупрозрачное зеркало.

В первой главе приводятся результаты расчетов «пустых» резонаторов с отверстиями связи методом интегральных уравнений.

Эти результаты позволили дать качественную оценку некоторым экспериментам, описанным в третьей главе.

В настоящее время при исследовании активных резонаторов авторы многих работ оценивают полученные результаты на основе полуклассической теории Лэмба [3]. Но все известные классические и полуклассические подходы к решению задачи активного резонатора и, тем более, теория «пустых» резонаторов не дают точного представления о связи процессов, определяющих механизм инверсии с параметрами резонатора. Для ОКГ на CO_2 в работе [4] введена связь между одним из основных параметров резонатора добротностью (Q) и скоростью создания инверсии. Этим уравнением пользуются авторы [5] при решении задачи генерации в CO_2 -лазере непрерывного действия. Добротность резонатора в этом уравнении определяется через параметры l (длина резонатора) и R (коэффициента отражения). Эти параметры не меняются со временем, поэтому в импульсном режиме работы ОКГ на CO_2 связь добротности резонатора со скоростью инверсии может быть представлена таким же уравнением.

Что касается коэффициента отражения, то для зеркал с отверстием связи он был представлен зависимостью от диаметра отверстия связи следующим образом:

а) для малых отверстий связи —

$$R_{\text{эф}} = 1 - \frac{d}{D},$$

б) для больших отверстий связи —

$$R_{\text{эф}} = 1 - \frac{d^2}{D^2},$$

где d — диаметр отверстия связи, D — диаметр апертуры зеркала.

Общая система уравнений, описывающих режим генерации в импульсном ОКГ на CO_2 , была решена на ЭВМ «Минск-22» для режима возбуждения активной смеси одиночным длинным

и коротким импульсами тока. Были определены мощность, развитие и длительность импульса генерации, изменение инверсии в генерирующей плазме. Однако для машинного решения одного варианта этой системы требуется очень много времени (4—5 часов). Поэтому расчетный анализ различных зависимостей характеристик излучения в импульсном ОКГ на CO_2 в широком диапазоне изменения параметров, определяющих режим генерации, был крайне затруднителен.

В конце первой главы показано, что в случае возбуждения активной смеси CO_2 -лазера короткими (единицы микросекунд) одиночными или повторяющимися с частотой f импульсами тока режим генерации может быть описан простыми уравнениями, имеющими аналитическое решение. В основу этих более простых уравнений легли следующие допущения.

1. Инверсия в активной среде под действием импульса тока возрастает линейно в зависимости от амплитуды и длительности импульса тока [6]. Плотность излучения в этот период очень мала.

2. Максимальная инверсия в активной среде достигается с начала возбуждения через время, примерно равное длительности импульса тока, и с этого момента начинается эффективная генерация. Это предположение подтвердилось экспериментально наблюдаемым в исследуемом режиме сдвигом импульса генерации по отношению к импульсу тока на время, равное длительности импульса тока. Исходя из этих допущений, развитие эффективной генерации в CO_2 -лазере при возбуждении его активной смеси короткими импульсами тока может быть записано двумя уравнениями:

— уравнением релаксации инверсии под действием лазерных переходов, причем начальное значение инверсии равно ее максимальному значению, которое она принимает от начала возбуждения через время порядка длительности импульса тока, изменяясь по линейному закону;

— уравнением, описывающим изменение во времени плотности мощности эффективной генерации с начальным значением этой плотности приблизительно равным нулю.

Получены формулы для пиковой мощности, энергии, длительности импульса генерации, определяющие эти характеристики излучения через параметры резонатора, состав активной смеси, амплитуду, длительность и частоту следования импульсов тока возбуждения.

Для проверки полученных формул расчетная зависимость пиковой мощности от амплитуды разрядного тока была сопо-

ставлена с данными эксперимента. Это сравнение дало хороший результат. (Расхождение было порядка 14% и только при очень больших амплитудах тока кривые расходятся).

Вторая глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию ОКГ на CO_2 при возбуждении активной смеси короткими повторяющимися импульсами тока. В двух первых параграфах этой главы описывается экспериментальная установка, сконструированная для исследования характеристик излучения ОКГ на CO_2 с резонаторами различной геометрии при различных режимах работы (непрерывный и импульсный режимы), и методика проведения экспериментов.

Установка состоит из лазерного блока (сам лазер, система напуска и измерения давления), блока, обеспечивающего возбуждение ОКГ стационарным разрядом, и блока, обеспечивающего питание ОКГ импульсами тока амплитудой до 70а при длительности импульса тока $\tau_i \approx 1-2$ мксек и напряжении до 80 кв. Частота повторения импульсов возбуждения могла меняться от одиночного импульса до 100 гц. При этом мощность в импульсе не менялась.

В экспериментах использовались две лазерные трубки, имеющие длину разрядного промежутка $l = 140$ см и внутренние диаметры 34 и 50 мм. Состав активной смеси изменялся в широком диапазоне соотношений парциальных давлений газов CO_2 , N_2 и He и общих давлений в трубке. Что касается вопросов методики, то основной проблемой в измерениях характеристик излучения ОКГ оказалось влияние параметров резонатора (геометрии зеркал, диаметра отверстия связи) на вольт-амперные характеристики разряда: в условиях отсутствия генерации при замене резонатора лазера наблюдался разброс вольт-амперных характеристик разряда в пределах до 70%. При использовании оправ для зеркал из фторопласта и заземлении поверхности выходного зеркала (с отверстием связи) через большое сопротивление разброс вольт-амперных характеристик при замене резонаторов составил всего лишь 2-3%.

Что касается непосредственно измерений характеристик излучения, то с помощью специально сконструированного устройства в процессе эксперимента одновременно измерялись средняя мощность генерации (специальная термопара), развитие и длительность импульса генерации (охлаждаемое фотосопротивление Ge—Au и специальный приемник, работа которого основана на термоупругом эффекте в кварце). В отдельных экспериментах измерялась энергия излучения (градуированный

калориметр). Измерение электрических параметров разряда производилось с помощью добавочного сопротивления (ток) и специального делителя напряжения (1 : 3600).

Как показал теоретический анализ импульсного ОКГ на CO_2 , образование инверсии в активной смеси связано, главным образом, с наличием достаточного количества свободных электронов в разряде или протеканием через смесь газов определенного тока. Поэтому зависимости параметров излучения от разрядного тока являются основными в характеристике лазера.

Следующие три параграфа второй главы посвящены экспериментальному исследованию зависимости выходной мощности ОКГ от амплитуды разрядного тока, а также влиянию парциальных давлений N_2 и He в активной смеси на мощность, развитие и длительность импульса генерации в режиме возбуждения короткими импульсами тока.

Установлено следующее.

1. Зависимость выходной мощности от амплитуды тока разряда имеет выраженный максимум, причем в смесях с большим содержанием азота этот максимум более выражен, чем в смесях с большим содержанием гелия. Кроме того, с увеличением содержания азота в активной смеси оптимальный для пиковой мощности ток уменьшается и наоборот — добавки гелия увеличивают значения оптимального тока.

2. В режиме коротких импульсов возбуждения оптимальными для большей мощности становятся активные смеси, в которых азота содержится больше чем гелия, в отличие от непрерывного режима работы того же лазера или режима длинных импульсов возбуждения (максимальная мощность в экспериментах была получена на смеси $\text{CO}_2-\text{N}_2-\text{He} = 1 : 4 : 2$ при общем давлении в трубке 7 торр.).

3. Импульс генерации по отношению к импульсу тока сдвинут на время порядка длительности импульса тока (τ_i) и состав смеси (в исследуемых пределах) незначительно влияет на этот сдвиг. Но длительность импульса генерации ($\tau_{\text{ген}}$) существенно зависит от состава смеси. С увеличением парциального давления азота длительность импульса генерации возрастает. Добавки гелия уменьшают $\tau_{\text{ген}}$.

4. В исследуемом режиме через время порядка сотен микросекунд после первого импульса генерации появляется второй импульс меньшей амплитуды и длительностью порядка нескольких десятков микросекунд. Амплитуда, длительность этого импульса, сдвиг его относительно первого импульса генерации существенным образом зависят от состава активной смеси

и амплитуды возбуждающего тока. С увеличением амплитуды тока второй импульс уменьшается, причем в смесях с большим содержанием азота второй импульс практически исчезает при токах чуть больших оптимальных для выходной мощности первого импульса. В смесях с большим содержанием азота второй импульс был нестабильным. Кроме того, при отсутствии в активной смеси азота в генерации наблюдается только один импульс.

Экспериментальные результаты и их оценки на основе литературных данных и решений уравнений, приведенных в первой главе, позволили установить, что основной реакцией, обеспечивающей создание инверсии в CO_2 -лазере, активная смесь которого возбуждается короткими импульсами тока, является возбуждение молекул CO_2 свободными электронами через удары первого рода. Резонансный характер зависимости выходной мощности от амплитуды разрядного тока определяется не разогревом газа, как, например, в случае непрерывного режима или режима длинных импульсов возбуждения [6], а наличием в функции распределения электронов максимума для плотности электронов, эффективных с точки зрения возбуждения верхнего лазерного уровня. Этот максимум определяется условиями разряда (давление и состав активной смеси, амплитуда разрядного тока, способ возбуждения и т. д.). Увеличение мощности генерации в исследуемом режиме при увеличении парциального давления азота можно объяснить тем, что с ростом давления в разряде уменьшается число быстрых и увеличивается число эффективных электронов т. е. азот выполняет роль резонансного фильтра для эффективных электронов в функции распределения. Наличие двух импульсов в генерации определяется различными механизмами заселения лазерных уровней:

— генерация, обусловленная инверсией через удары первого рода между свободными электронами и молекулами CO_2 с небольшим сдвигом этого импульса относительно импульса тока (первый импульс генерации);

— генерация, обусловленная инверсией через резонансное взаимодействие уровня 00^0_1CO_2 с первым колебательным уровнем молекул азота (второй импульс генерации).

В третьей главе приведены экспериментальные исследования ОКГ на CO_2 в режиме возбуждения короткими импульсами тока с резонаторами различной геометрии. В этой главе рассматривались следующие вопросы:

1) влияние параметров резонатора на пиковую мощность

импульсов генерации при различных парциальных давлениях газов активной смеси;

2) влияние резонаторов различной геометрии на процессы развития генерации в различных активных смесях;

3) энергетическая эффективность резонаторов различной геометрии;

4) сравнение эффективности резонаторов одной геометрии в режиме возбуждения активной смеси короткими импульсами тока и в непрерывном режиме;

5) стабильность оптимальных параметров резонатора при изменении состава и общего давления активной смеси.

Для полного ответа на поставленные в этой главе вопросы были проведены эксперименты со множеством резонаторов из различных областей диаграммы устойчивости. Основным критерием для подробных исследований резонатора была пиковая мощность, полученная в ОКГ с этим резонатором.

Проведенные на оптимальных смесях эксперименты показали, что имеет смысл наиболее подробно исследовать резонаторы двух серий: резонаторы, у которых одно из зеркал плоское (глухое зеркало), а другое — выпуклое с $g_2^* < 1$, и резонаторы, у которых глухое зеркало имело фокус равный примерно длине разрядной трубки, а другое — имело $g_2 > 1$.

Выходные зеркала имели отверстия связи 5, 8, 10, 12, 15, 20 мм.

В результате экспериментальных исследований было установлено следующее.

1. Параметры резонатора при постоянном составе активной смеси значительно влияют на мощность и энергию излучения ОКГ в исследуемом режиме. Это влияние определяется прежде всего связью резонатора с внешней средой и распределением поля внутри резонатора. При фиксированном отверстии связи существует определенное распределение поля (резонатор), обеспечивающее максимальную выходную мощность в импульсе. Для малых отверстий связи это полуконфокальный резонатор, для больших — резонатор, близкий к плоскому (1-я серия). Для второй серии это резонатор с $g_2 = 1,19$.

2. Для резонаторов первой серии характерна стабильность оптимальных по мощности параметров при изменении состава активной смеси. Это обстоятельство дает возможность прово-

* g -фактор определяется как $g_i = 1 - \frac{l}{R_i}$, где l — база резонатора, R_i — радиус кривизны зеркала с учетом знака.

дить оптимизацию состава активной смеси без учета влияния резонатора. Вторая серия резонаторов оказалась менее стабильной.

3. Оптимальное отверстие связи для пиковой мощности увеличивается при стремлении геометрии резонатора к плоскому (первая серия) и уменьшается во второй серии.

Здесь можно еще отметить, что при любой геометрии резонатора отверстие связи в импульсном режиме меньше, чем у того же резонатора в непрерывном режиме.

4. Временное развитие генерации в режиме возбуждения активной смеси короткими импульсами тока во многом определяют параметры резонатора и особенно наличие в генерации, кроме основного мощного импульса, еще одного или даже нескольких импульсов генерации.

Наибольшее отношение амплитуд этих импульсов дают резонаторы, далекие от оптимальных для основного импульса. Появление нескольких импульсов в генерации после основного импульса вызвано конкуренцией в колебательно-вращательных переходах. Эта конкуренция зависит от добротности резонатора. Для сильно связанного резонатора (низкая добротность, большие отверстия связи) конкуренция в переходах меньше (наблюдается практически один импульс генерации), чем в случае сильной связи (большая добротность, малые отверстия связи), где наблюдаются несколько импульсов генерации.

5. Энергия излучения в импульсе, особенно в смесях с большим содержанием азота, мало зависит от геометрии резонатора при любом отверстии связи и только ближе к плоскому, начиная с $g_2 = 0,75$ и при больших отверстиях связи на энергию излучения начинает сказываться влияние резонатора.

6. Оптимизация параметров резонатора с отверстием связи в импульсном и непрерывном режимах — две совершенно разные задачи. Оптимальные для выходной мощности параметры резонатора в непрерывном режиме работы не обеспечивают максимальной пиковой мощности и энергии излучения в импульсном режиме.

В приложении приведены результаты практического использования проведенных в диссертации исследований.

Абсолютные измерения мощности и энергии излучения, произведенные при отсутствии второго импульса генерации, дали следующие результаты: при оптимальном резонаторе и смеси $P_{\max} = 10-12$ квт, $W_{\max} = 0,15$ дж в импульсе. При частоте повторения импульсов генерации $f = 50$ гц такие параметры излучения дают возможность использовать СО₂-лазер в режиме

возбуждения активной смеси короткими импульсами тока при обработке материалов, используемых в микроэлектронике, так как такие материалы, как твердая и хрупкая керамика, ферриты, диэлектрические пленки на различных подложках (стекло, керамика, металлы), сильно поглощают электромагнитное излучение в ближней инфракрасной области спектра. Особый интерес представляет возможность использовать исследуемый режим работы СО₂-лазера при обработке ферритов (например, при изготовлении ферритовых матриц с большим количеством отверстий, широко применяющихся в вычислительной технике).

Были проведены исследования воздействия непрерывного и импульсного излучения СО₂-лазера на пластины феррита толщиной от 0,5 до 4 мм. Результаты этих исследований сравнивались с результатами обработки этих же пластин на твердотельных ОКГ (неодим и рубин).

Установлено, что режим генерации в ОКГ на СО₂ при коротких импульсах возбуждения при хорошей производительности и качестве «прошивки» отверстий имеет еще, и это самое главное, гораздо лучшие результаты с точки зрения изменений магнитных свойств феррита в зоне обработки, чем обработка феррита излучением твердотельного лазера. Зона с микротрещинами (свидетельство необратимых изменений магнитных свойств феррита) вокруг отверстия в пластине в этом случае была в 1,5—2 раза меньше, чем в случае обработки такой же пластины феррита одиночным импульсом от неодимового лазера.

Кроме ферритов, обработке излучением исследуемого лазера подвергались керамика, пластины меди, стали, диэлектрические пленки на различных подложках, стеклянные пластины. При обработке всех материалов (кроме металлов) исследуемый в диссертации режим работы СО₂-лазера оказался очень эффективным.

Все исследования, проведенные в диссертации, были положены в основу разработки макета универсальной установки для обработки материалов, используемых в микроэлектронике. Эта установка с некоторыми конструктивными доработками может быть использована в таких областях, как медицина (хирургия), связь, локация и т. д.

Заключение

В рассматриваемой диссертационной работе получены следующие основные результаты.

1. В результате теоретического исследования работы импульсного ОКГ на CO_2 , активная смесь которого возбуждается короткими одиночными или повторяющимися с частотой f импульсами тока, получены простые уравнения, описывающие режим генерации и имеющие аналитическое решение (известные в литературе наиболее полные схемы расчета инверсии и режима генерации в ОКГ на CO_2 решаются только на ЭВМ). Решение этих уравнений позволяет в общем виде анализировать зависимость мощности, энергии излучения ОКГ от основных параметров, определяющих режим генерации (состав и давление активной смеси, конструктивные параметры лазера, некоторые параметры резонатора).

2. Проведено сравнение результатов расчета аналитического решения для зависимости максимальной выходной мощности от амплитуды тока разряда с экспериментом. Сравнение показало, что полученное решение обеспечивает достаточную точность для качественного анализа режима генерации.

3. Экспериментально исследованы характеристики излучения импульсного ОКГ на CO_2 , активная смесь которого возбуждается короткими, следующими с частотой $f=50$ гц, импульсами тока.

В исследуемом режиме установлено, что:

а) основной реакцией, обеспечивающей создание инверсии, является возбуждение молекул CO_2 непосредственно электронным ударом;

б) основная зависимость пиковой мощности от амплитуды разрядного тока имеет выраженный максимум. Резонансный характер этой зависимости определяется не разогревом газа, как в случае непрерывного режима или режима длинных импульсов возбуждения, а наличием при данных условиях (состав, давление смеси, амплитуда тока, частота повторения импульсов возбуждения и т. д.) максимума в распределении эффективных для возбуждения верхнего лазерного уровня электронов;

в) амплитуда тока, при которой достигается максимальная мощность генерации, зависит от состава смеси. Она уменьшается с увеличением в активной смеси парциального давления азота и увеличивается при увеличении давления He;

г) длительность импульса генерации увеличивается с увеличением давления азота в активной смеси и уменьшается с увеличением давления гелия.

4. Экспериментально показано, что в исследуемом режиме оптимальные для получения большой мощности и энергии из-

лучения активные смеси должны содержать азота больше, чем гелия, в отличие от непрерывного режима работы ОКГ на CO_2 и режима длинных импульсов, где оптимальными являются смеси, в которых гелия в несколько раз больше, чем азота. Наиболее оптимальной смесью в исследуемом режиме была смесь $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—He}=1:4:2$ при общем давлении в трубке 7 торр.

5. В исследуемом режиме работы ОКГ на CO_2 генерация представляет собой не один, а минимум два импульса, каждый из которых имеет свой механизм заселения лазерных уровней:

— генерация с большой амплитудой, обусловленная инверсией через возбуждение молекул CO_2 электронным ударом с небольшим сдвигом этого импульса относительно импульса тока возбуждения;

— генерация с меньшей амплитудой, обусловленная инверсией через резонансное взаимодействие уровня OO^1CO_2 с первым колебательным уровнем азота.

В смесях с большим содержанием гелия и малым азота второй импульс практически отсутствует.

6. Экспериментально изучены характеристики генерации ОКГ на CO_2 с резонаторами различной геометрии, излучение из которых выводится через отверстие связи. Предложена методика эксперимента, позволяющая исключить при исследовании влияние геометрии резонатора на условия разряда.

Установлено, что:

а) оптимальные для выходной мощности параметры таких резонаторов в непрерывном режиме работы ОКГ не обеспечивают максимальной пиковой мощности и энергии излучения в исследуемом режиме. В частности, оптимальное отверстие связи для резонатора любой геометрии в непрерывном режиме больше, чем у того же резонатора в импульсном режиме;

б) наибольшая мощность и энергия излучения ОКГ на CO_2 в исследуемом режиме достигается при использовании резонаторов, у которых одно из зеркал (глухое) либо плоское ($g_1=1$), либо с фокусом, равным длине разрядной трубки ($g_2\approx 0,5$);

в) оптимальная геометрия второго зеркала определяется, прежде всего, связью резонатора с внешней средой, т. е. диаметром отверстия связи, в отличие от резонаторов с полупрозрачными зеркалами, где оптимальными для выходной мощности считаются геометрии резонаторов, обеспечивающие наибольший объем основных мод. Для малых отверстий связи (до 8 мм) оптимальными являются резонаторы, близкие к полуконфокальному ($g_1=1, g_2=0,5$), и резонатор с $g_1=0,53$,

$g_2 = 1,19$. При больших отверстиях связи (10—20 мм) оптимальными становятся резонаторы, близкие к плоскому ($g_1 = 1, g_2 = 0,9$);

г) плоский резонатор и близкие к нему (с $g_2 > 0,9$) дают неустойчивую генерацию.

7. Экспериментально изучено влияние резонаторов различной геометрии на временное развитие генерации.

Установлено, что:

а) длительность первого импульса генерации определяется в основном геометрией резонатора. Минимальную длительность для большинства смесей при заданном отверстии связи обеспечивает резонатор, близкий к полуконфокальному;

б) параметры резонатора значительно влияют на развитие второго импульса генерации. Для резонаторов с малыми отверстиями связи (до 8 мм) второй импульс генерации разделяется на два—три отдельных импульса;

в) наибольшее отношение (до 0,5—0,6) амплитуд первого и второго импульсов дают резонаторы, далекие от оптимальных для основного импульса.

Оптимальные для первого импульса резонаторы имеют это отношение в пределах 0,05—0,2.

8. Энергия излучения в основном импульсе, особенно в смесях с большим содержанием азота, мало зависит от геометрии резонатора при любом отверстии связи и только ближе к плоскому, начиная с $g_1 = 1, g_2 = 0,75$, и при больших отверстиях связи начинает сказываться влияние геометрии резонатора. Энергия излучения в основном определяется составом активной смеси.

9. В исследуемых пределах давлений резонаторы первой серии характеризуются стабильностью оптимальных по мощности параметров при изменении состава активной смеси. Вторая серия оказалась в этом отношении менее стабильной.

10. Экспериментально установлено, что распределение поля излучения ОКГ в ближней зоне зависит главным образом от диаметра отверстия связи и состава активной смеси. Поле, близкое к одному однородному пятну, давали резонаторы с малыми отверстиями связи (до 8 мм) в смесях с большим содержанием гелия. Самые хорошие результаты с этой точки зрения на всех исследуемых смесях дали резонаторы второй серии и резонаторы, близкие к полуконфокальному из первой серии.

11. Проведены эксперименты по обработке большого количества материалов, используемых в микроэлектронике (особое внимание было уделено обработке ферритов), излучением ис-

следуемого в работе импульсного ОКГ на CO_2 . Полученные результаты показали, что ОКГ с возбуждением короткими и следующими с частотой f импульсами имеет значительные преимущества (быстрота, качество обрабатываемых отверстий, широкие возможности в изменении параметров излучения ОКГ) при обработке ферритов (в этом случае была минимальная зона, в которой происходили необратимые изменения в свойствах ферритов) и хрупких материалов (керамика, стекло) перед лазером на CO_2 , работающим в непрерывном режиме, или твердотельными лазерами. В настоящее время ведется работа по созданию законченной конструкции технологической установки с ОКГ на CO_2 , работающим в исследуемом режиме.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Ю. А. Балашин, Н. Е. Аверьянов, К. И. Крылов. Влияние на выходную мощность отверстия связи резонатора газового ОКГ на CO_2 , работающего в режиме возбуждения микросекундными импульсами тока. Изв. вузов СССР — «Приборостроение» (в печати).

2. Ю. А. Балашин, Н. Е. Аверьянов, К. И. Крылов. Оптимизация параметров газового лазера на CO_2 , работающего в импульсном режиме. Труды конференций по электронной технике «Газовые оптические квантовые генераторы», № 2 (18). 16, 1970.

3. Н. Е. Аверьянов, Ю. А. Балашин, М. П. Богданов, В. Т. Прокопенко. Резонаторы с отверстием связи для лазеров на CO_2 . Труды конференций по электронной технике «Газовые оптические квантовые генераторы», № 2 (18), 16, 1970.

4. Ю. А. Балашин, Н. Е. Аверьянов. Особенности работы импульсного газового лазера на основе CO_2 в режиме мгновенной перестройки добротности. Труды ЛИТМО. «Вопросы квантовой электроники», вып. 67, стр. 105, 1970.

5. Ю. А. Балашин, В. Т. Прокопенко, М. П. Богданов. О некоторых исследованиях резонатора для лазера на основе CO_2 . Труды ЛИТМО. «Вопросы квантовой электроники», вып. 65, стр. 33, 1968.

6. Ю. А. Балашин, М. П. Богданов, К. И. Крылов, В. Т. Прокопенко. Исследование стабильности работы лазера на основе CO_2 . Труды ЛИТМО. «Вопросы квантовой электроники», вып. 65, стр. 25, 1968.

Отдельные вопросы по теме диссертации были изложены:

1. На III-й Всесоюзной конференции по газоразрядным приборам. Рязань, май, 1970 г.

2. На семинарах и конференциях секции «Квантовой радиоэлектроники» НТО радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова в период с 1966 по 1970 гг.

3. На Научно-технической сессии аспирантов ЛИТМО. Ленинград, февраль, 1966.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Тычинский. УФН, 91, 389, 1967.
2. А. С. Бирюков, Б. Ф. Гордиец, Л. А. Шелепин. ЖЭТФ, 57, 585, 1969.
3. W. F. Lamb. Phys. Rev. 134, A1429, 1964.
4. W. J. Witteman. Philips Research. Rep., 21, 73, 1966.
5. Б. Ф. Гордиец, Н. Н. Соколов, Л. А. Шелепин. ЖЭТФ, 53, 1822, 1967.
6. Г. Р. Левинсон, А. Н. Свиридов, В. П. Тычинский, В. Г. Фролова. ЖПС, 3, 424—433, 1969.