

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.373.8

**3D-ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО
ВОЛНОВОДНОГО СО₂-ЛАЗЕРА С ПОПЕРЕЧНЫМ
ВЧ-ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

©2024 г. В. А. Степанов^{a,*}, Е. Н. Моос^a, Р. С. Румянцев^a,
А. И. Кудюкин^a, К. И. Бобровский^b, А. Я. Паюров^c

^a Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина

Россия, 390000, Рязань, ул. Свободы, 46

^b ООО “Вакуумные технологии”

Россия, 390000, Рязань, пр. Яблочкова, 5Б, лит. В

^c АО “Плазма”

Россия, 390023, Рязань, ул. Циолковского, 24

*e-mail: vl.stepanov@365.rsu.edu.ru

Поступила в редакцию 13.02.2024 г.

После доработки 24.06.2024 г.

Принята к публикации 29.11.2024 г.

Работа посвящена 3D-проектированию находящегося на стадии разработки нового прибора – цельнометаллического волноводного СО₂-лазера (элементов и всего прибора) с использованием отечественных прецизионных алюминиевых профилей. Показан 3D-вид отдельных узлов и всего лазера. Описываются схемы воздушного и водяного охлаждения, технология сборки и герметизации СО₂-лазера с помощью лазерной (плазменной) сварки и клеевых соединений, обеспечивающих высокое качество и надежность прибора.

1. ВВЕДЕНИЕ

Газоразрядные СО₂-лазеры являются одним из наиболее представительных классов лазеров. Высокий КПД, диапазон мощности, высокая монохроматичность излучения обеспечивают локальность их воздействия. Одновременно важна способность СО₂-лазеров работать в импульсном, импульсно-периодическом и непрерывном режимах генерации. Данные приборы незаменимы в физических исследованиях и в технологии обработки материалов [1, 2].

Постоянное расширение областей применения и конкурентная борьба заставляют специалистов ведущих фирм разрабатывать новые и непрерывно совершенствовать уже созданные образцы. В результате на рынке промышленных изделий лидирующее место сегодня заняли компактные цельнометаллические приборы. Особенно выделяется волноводный вариант с поперечным высокочастотным возбуждением. В конструкциях этих лазеров применяются прецизионный прокат алюминиевых сплавов, современные методы формообразования и прогрессивные технологии высокогерметичных соединений [3–5].

Актуальность работы обусловлена широкими исследованиями цельнометаллического волноводного CO₂-лазера. Его конструкция построена на основе отечественных прецизионных алюминиевых профилей и 3D-методов проектирования [6, 7].

2. 3D-ПРОЕКТИРОВАНИЕ УЗЛОВ И КОНСТРУКЦИИ ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДНОГО CO₂-ЛАЗЕРА

3D-моделирование – это процесс создания трехмерной модели объекта и разработка визуального объемного образа желаемого объекта. С помощью трехмерной графики можно создать точную копию конкретного предмета и разработать новую, зачастую сложно представимую конструкцию.

Главное достоинство и преимущество 3D-моделирования – наглядность и возможность одновременного параллельного проектирования. При этом обеспечено автоматическое согласование вносимых изменений, доработок как узлов, так и всего устройства. Кроме того, появилась возможность расчета тепловых и прочностных эксплуатационных характеристик на всех этапах разработки и изготовления устройства. Современные технологические обрабатывающие центры, станки с числовым программным управлением позволяют значительно сократить время изготовления изделия и временной интервал от идеи до выпуска готовой продукции.

Разработка конструкции осуществлялась в программной среде КОМПАС-15.

На рис. 1 представлен вариант Z-образной разрядной структуры, образованной двумя швеллерами-электродами из алюминиевого сплава АД31Т. Волноводный Z-образный канал получается фрезерованием соответствующих полуцилиндрических пазов на внешней поверхности данных швеллеров и последующей симметричной сборкой. Диаметр канала равен примерно 3 мм. Для уменьшения волноводных потерь на рабочих длинах волн CO₂-лазера поверхность электродов покрывается оксидом алюминия (α -Al₂O₃).

Рис. 1. Вариант Z-образной разрядной структуры

Канал такой формы позволяет уменьшить габариты при тех же мощностях излучения лазера на единицу длины. При этом, однако, в конструкции необходимы дополнительные поворотные зеркала с регулировкой их положения.

Горение разряда в рабочем канале требует исключения его развития в нерабочем зазоре между электродами. Условие этого таково: величина межэлектродного промежутка (примерно 0.5 мм), значительно меньшая диаметра рабочего канала (около 3 мм). При рабочем давлении газовой смеси в рабочем канале разряд в зазорах менее 0.5 мм невозможен из-за медленного формирования необходимых для этого приэлектродных слоев. Величина зазора и его регулировка обеспечиваются установкой на торцах и в середине разрядной структуры дополнительных керамических фиксаторов.

На внешней поверхности электродов фрезерованием выполнены пазы глубиной примерно 0.5 мм. В них помещают керамические алюмонитридные (AlN) пластины толщиной 1 мм для изолирования корпуса и разрядной структуры. Во внутренней полости каждого из швеллеров-электродов устанавливаются согласующие катушки индуктивности из медной проволоки диаметром 1.5 мм (примерно 23 штуки). Дополнительная фиксация электродов и увеличение общей жесткости разрядного блока (блока арматуры) обеспечиваются стяжками. В середине внешней поверхности электродов есть два резьбовых отверстия М4 для тоководов, подводящих высокочастотную мощность. Электроды соединяются шпильками, добавляются керамические шайбы и фиксатор регулятора межэлектродного зазора.

Достоинство данной конструкции излучателя в применении профилей из алюминиевых сплавов. Выбранное симметричное поперечное сечение корпуса лазера обеспечивает устойчивость к внешним воздействиям. Компактность лазера в целом и надежность его возбуждения в возможности совмещения источника ВЧ-возбуждения и излучателя. При сборке конструкции необходим тщательный контроль герметичности соединения узлов. Следует учитывать, что устройство может работать при повышенных температурных режимах, особенно при воздушном охлаждении. Это требуется при создании радиаторов. Необходимая степень изоляции обеспечивается уменьшением нерабочих зазоров, в которых затруднено возникновение разряда, а также алундированием (оксидированием) контактирующих поверхностей и тонких керамических шайб.

Охлаждение осуществляется двумя алюминиевыми радиаторами-пластинами с каналами для прохождения воды (рис.2).

Рис. 2. Собранная разрядная структура 3D и корпус (бокс)

Радиаторы имеют симметричную форму. Каналы для протекания охлаждающей жидкостью также симметричны. Изгибы каналов способствуют возникновению турбулентного режима протекания жидкости и эффективности теплоотвода (рис. 3).

Рис. 3. 3D-модель и 2D-чертеж жидкостного радиатора

Юстировочные фланцы представляют собой две пластины с отверстиями под зеркала, штенгеля для откачки и крепеж (рис. 4). Фланцы из сплава АД31Т имеют форму параллелепипеда и обладают большой жесткостью на изгибы и большой механической прочностью.

Рис. 4. Фланцы с узлами юстировки (2D- и 3D-изображения)

ВЧ-драйвер представляет собой автогенератор на четырех транзисторах (рис. 5) с номинальной частотой 81.36 МГц. Он осуществляет ВЧ-накачку активной среды лазера. В качестве силовых высокочастотных транзисторов использовались MOSFET-транзисторы MRF150 с рабочим диапазоном частот 30–150 МГц, токовой нагрузкой 16 А, максимальной выходной мощностью до 150 Вт. Автогенератор имеет симметричный выход и подключен к двум токовводам излучателя. Регулировка средней мощности накачки осуществляется с помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ) питания силовых транзисторов (рис.5).

Рис. 5. 3D-модель высокочастотного драйвера

Разрядная структура-волновод помещается внутрь бокса. В пазы разрядной структуры устанавливаются AlN (алюмонитридные) изоляторы. Они являются электрическими развязками разрядной структуры и бокса (рис.6).

Рис. 6. Бокс с разрядной структурой

Бокс и пластины-радиаторы соединены шпильками М6 с жесткой фиксацией положения разрядной структуры внутри бокса. Винтами М5 соединены фланцы, собранные с узлами юстировки, зеркалами и краном для откачки/наполнения. В месте стыковки фланцев и бокса есть резиновое уплотнение для герметизации объема (рис. 7). ВЧ-драйвер устанавливается на верхнем радиаторе.

После сборки следуют операции откачки, отжига и наполнения газовой смесью рабочего объема лазера. Затем прибор тренируется (разд. 3).

Рис. 7. Герметичный бокс с оптической системой

3. ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ

В зависимости от назначения волноводные CO₂-лазеры могут эксплуатироваться в диапазоне температур окружающей среды от -50 °С до +55 °С при условии обеспечения тепловых режимов их работы.

По способу отвода тепла из разряда приборы делятся соответственно на излучатели с воздушным (В) и жидкостным (Ж) охлаждением. В первом случае охлаждение происходит за счет естественной или принудительной конвекции воздуха на радиаторах с развитой поверхностью (продольные или поперечные ребра, а также многоштырьковые варианты).

С учетом симметрии излучателя тепловые потоки рассматриваются только в одной из четвертей (одном квадранте) поперечного сечения (рис. 4). Теплообменом с торцов излучателя пренебрегаем. При этом исходная величина тепловыделения составит около 225 Вт. Радиатор воздушного охлаждения представляет собой набор штампованных пластин из алюминиевого сплава. Они фиксированы на внешней поверхности корпуса с использованием теплопроводящей пасты типа КПТ-8. Внешняя поверхность пластин представляет собой ребристый радиатор: высота ребер 26 мм, расстояние между ребрами 6.3 мм, количество ребер 15, материал – алюминиевый сплав АД 31 с теплопроводностью 188 Вт/(м·К) (рис.8).

Рис. 8. Направление движения тепловых потоков

Эффективность данного радиатора достигается принудительным обдувом воздушным потоком со скоростью $V = 6.5$ м/с при атмосферном давлении и температуре 20 °С. Радиатором охлаждения излучателя лазера является радиаторный профиль из алюминиевого сплава АД31Т с теплопроводностью 188 Вт/(м·К).

Для эффективного охлаждения площадь покрытия увеличена. Это обеспечивается ребрами высотой от 20 мм до 35 мм. При жидкостном (водяном) охлаждении в радиаторах имеются соответствующие каналы. При мощности лазерного излучения порядка 40–45 Вт требуется повышенный теплоотвод. Поэтому в данном устройстве используется жидкостное охлаждение. При оценке эффективности теплоотвода в излучателе необходимо рассмотреть условия теплообмена на контактирующих поверхностях с перепадами температур. Для мощности излучения 40–45 Вт активная длина разряда должна составлять величину около 111 см, при реальном КПД 10% мощность разряда составляет примерно 450 Вт. С учетом ВЧ-источника суммарное тепловыделение достигает примерно 900 Вт.

Рассмотрим тепловые потоки с учетом симметрии излучателя только в одной из четвертей (одном квадранте) поперечного сечения (рис. 9).

Рис. 9. Направление тепловых потоков при жидкостном охлаждении

В каналах охлаждения происходит вынужденный конвективный теплообмен при движении жидкости. Тепловой поток при этом пропорционален площади поверхности стенки и разности температур жидкости и стенки (температурному напору):

$$W = \alpha S \Delta t. \quad (1)$$

На коэффициент теплоотдачи α влияют различные факторы. К ним относятся физические свойства жидкости, скорость ее потока, геометрия и качество поверхности

охлаждающего канала. Это определяет ламинарный, переходный или турбулентный режим течения жидкости. Скорость потока и формы охлаждающего канала задает турбулентный режим течения жидкости, что увеличивает эффективность теплообмена. Характер течения жидкости определяется числом Рейнольдса

$$Re = \frac{4 V}{\pi d \nu}, \quad (2)$$

где V [$\text{м}^3/\text{с}$] – объемный расход жидкости, d [м] – диаметр охлаждающего канала, ν [$\text{м}^2/\text{с}$] – кинематическая вязкость жидкости,.

При $Re < 2200$ режим движения жидкости в трубе ламинарный. Для Re от $2.2 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^4$ реализуется переходный режим, а при $Re > 1 \cdot 10^4$ – турбулентный.

Коэффициент теплоотдачи α при вынужденном движении жидкости рассчитывается на основе зависимостей между критериями Нуссельта $Nu_{ж}$, Рейнольдса $Re_{ж}$ и Прандтля $Pr_{ж}$.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕРМЕТИЗАЦИИ И ТЕРМОВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДНОГО CO_2 -ЛАЗЕРА

Общепринятые способы соединений в конструкции лазера дают предельно низкую газопроницаемость и газоотделение. В последние годы в этих целях стали активно использоваться различные виды уплотнений и клеевых соединений, что обусловлено появлением новых материалов и современных технологий.

Традиционными методами герметизации конструкции газоразрядных CO_2 -лазеров являются различные виды сварки и пайки. Клеевые соединения до последнего времени существовали в первую очередь для герметизации оптических элементов. Это, прежде всего, пленочный клей марки ПКС-171 (ТУ 6-06-20-88), который получается из спиртового раствора полиамидной смолы 6/66/610-1, клея марки ПФЭ - 2/10, эпоксидной смолы ЭД-20, дициандиамида, фосфонитриланилида и аминопропилтриэтоксилана (аппрет АГМ-9).

Металлы (сталь и ее сплавы, алюминий и его сплавы, дюралюминий, золото, серебро и др.) склеиваются с неметаллическими материалами (керамика, кварц, стекло, углепластики, полиамиды и др.) в интервале температур от $120 \text{ }^\circ\text{C}$ до $240 \text{ }^\circ\text{C}$, давлении от 0.05 до 4.5 МПа (от 0.5 до 45 $\text{кгс}/\text{см}^2$) с выдержкой от 20 с до 5 ч.

Эти клеевые соединения отличаются высокими показателями прочности клеевого шва, высокими электроизоляционными свойствами, хорошими диэлектрическими свойствами, а также низкой газопроницаемостью и газоотделением. Область рабочих температур: от $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+150 \text{ }^\circ\text{C}$, кратковременно до $+200 \text{ }^\circ\text{C}$ [8, 9]. Эффективное применение данного вида клея и клеев вообще дает подготовка соединяемых поверхностей. Она осуществляется, как правило, в два этапа.

Важной отличительной особенностью современных конструкций цельнометаллических CO₂-лазеров является широкое использование уплотнений из различных материалов, в частности из витона и индия. Рассмотрим подробнее их характеристики.

Синтетический резиноподобный материал (эластомер) витон с химической точки зрения является линейным сополимером винилиденфторида и гексафторпропилена. Этот материал представлен прокладками круглого или плоского сечения разнообразной формы [10].

При герметизации современных цельнометаллических конструкций применяются уплотнения из высокопластичных металлов. В частности, это прокладки из индия или его сплавов с другими металлами. Такие уплотнения можно почти бесконечно деформировать под давлением, поскольку они не упрочняются при обработке. Это чрезвычайно полезно для разборных или отпаиваемых приборов, работающих при температурах ниже точки плавления индия [11]. При этом он устойчив к растворам сильных щелочей.

В общую структурную схему изготовления газоразрядного CO₂-лазера входят операции металлообработки, очистки и термообработки деталей, прокладки уплотнения, сборки и контроля сборочных операций, юстировки зеркал, а также согласования излучателя с ВЧ-генератором. Финишными операциями являются термовакуумная обработка, тренировка в рабочей смеси газов, окончательная сборка, настройка и измерение параметров лазера в целом.

Присутствие в газовой среде водорода, воды, органических примесей, в том числе паров масел, снижает мощность излучения и влияет на долговечность CO₂-лазера. Поэтому на этапе сборки выполняется тщательное обезжиривание всех деталей в трихлорэтилене и дегазация в вакууме. Это обеспечивает эффективное удаление водорода из объема деталей. Если конструкционный материал – алюминий, то в присутствии атомарного и молекулярного кислорода в разряде образуется оксидная пленка. Происходит необратимое удаление кислорода из среды, что смещает равновесие реакции диссоциации вправо. Для предотвращения этого детали разрядной структуры проходят обработку в два этапа.

На первом этапе детали монтируются на оснастку, запаиваются в стеклянные колбы, отжигаются в вакууме и затем окисляются в кислороде при температуре 300 °С в течение 3 ч. Толщина оксидной пленки после отжига и окисления составляет 0.3–0.8 мкм, она контролируется микроинтерферометром МИИ-4.

Термовакуумная обработка включает в себя откачку, дегазацию в печи и тренировку в разрядной смеси рабочих газов. Следующим этапом является тренировка в разряде рабочей смеси газов. Она состоит из CO₂, азота, гелия, ксенона в соотношении 1:1:4:0.25, тренировка

проходит в циклическом режиме – 4 раза по 60 мин с откачкой и заменой наполнения. Тренировка в разряде обеспечивает насыщение поверхностных слоев элементов арматуры рабочими газами и начальную обработку поверхности электродов. Это, однако, не обеспечивает работоспособность излучателя в течение длительного периода времени [3]. Деградация рабочей смеси вызывается диссоциацией молекул CO_2 . Степень диссоциации со временем растет, что связано с постепенным необратимым уходом образующегося в ходе диссоциации кислорода.

Для уменьшения скорости потерь кислорода или компенсации этих потерь используются различные методы – как пассивные, так и активные. К пассивным методам относится использование дополнительного объема.

Более эффективной для уменьшения потерь кислорода, как показали масс-спектрометрические исследования, является пассивация поверхности при длительной (около 100 ч) тренировке активного элемента в разряде рабочей смеси канала. Она приводит к уменьшению потерь кислорода. При этом происходит интенсивное насыщение стенок разрядного канала компонентами рабочей смеси и сравнительно неглубокое окисление металлических поверхностей. Подобная пассивация в сочетании с напылением пленки Al_2O_3 позволяет увеличить долговечность CO_2 -лазера в несколько раз (до 5000 ч и более) [3].

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

К основным лазерным параметрам, как правило, относятся мощность излучения, ее зависимость от времени, диаметр и расходимость пучка лазерного излучения, поляризация, спектральный состав (длина волны, количество частот и др.). Приборы могут работать как в непрерывном режиме, так и в импульсном (периодическом), поэтому и измерение характеристик требует применения измерительной аппаратуры различного быстродействия. Распространение обычных оптических методов измерения на такие малые времена и на чрезвычайно высокие плотности потоков требует как усовершенствования и развития старых методов, так и создания новой измерительной техники.

К более тонким лазерным параметрам относятся особенности спектра мод резонатора, усиление, шумы и возможность модуляции. Измерение внутренних и внешних лазерных параметров проводится при помощи датчиков сигнала, мощности и энергии [1].

При измерении расходимости пучка методом двух сечений луч лазера направляется на входное устройство (измерителя распределения плотности мощности пучка излучения), сигнал с которого подается на двухкоординатный самописец.

Для измерения основных энергетических и спектральных характеристик собранного экспериментального образца была создана измерительная установка, блок-схема которой представлена на рис. 10.

Рис. 10. Блок-схема экспериментальной установки для измерения энергетических и спектральных характеристик лазерного излучения

Излучение от лазера через ослабитель 4 поступает либо на измеритель мощности 5, либо на измеритель распределения плотности мощности пучка излучения 7, либо на ПАС.

При измерении расходимости пучка методом двух сечений луч лазера направляется на вход устройства 7 (измерителя распределения плотности мощности пучка излучения), сигнал с которого подается на двухкоординатный самописец 6. Расходимость оценивается по результатам измерения двух диаметров лазерного пучка на расстоянии 500 и 1000 мм по формуле

$$\Theta_p = \frac{d_1 - d_2}{\Delta L}, \quad (3)$$

где Θ_p [рад] – расходимость пучка излучения, ΔL [мм] – расстояние между двумя сечениями, на которых измеряются диаметры, d_1 [мм] – диаметр пучка излучения, измеренный в первом сечении, d_2 [мм] – диаметр пучка излучения, измеренный во втором сечении,.

Измерение параметров осуществляется по уровню 0.5 от максимума. На записанной кривой отмечают точки на уровне 0.5 от максимального значения и соединяют эти точки отрезком прямой длиной Δx_1 , Δx_2 [мм] для первого и второго сечений соответственно. Диаметры пучка излучения определяются следующим образом:

$$d_1 = k \cdot \Delta x_1, \quad d_2 = k \cdot \Delta x_2, \quad (4)$$

где d_1 , d_2 [мм] – диаметры пучка на уровне $0.5A_{\max}$ для первого и второго сечений соответственно, k – масштабный коэффициент, определяемый техническими характеристиками сканирующего устройства и графопостроителя ($k = 0.18$).

Схемы, поясняющие принципы измерения расходимости и диаметра пучка излучения, представлены на рис. 7, 8.

Измерения мощности излучения проводились в форсированном режиме автогенератора с МДИН 70%, с выходным зеркалом, коэффициент пропускания которого составлял 30%, и при давлении газовой смеси, равном 80 мм рт. ст. При 70% PWM (Power Width Modulation, широтно-импульсная модуляция – процесс управления мощностью

методом периодического включения и выключения прибора) мощность излучения составила 22 Вт (рис.11–13).

Рис. 11. Схема измерения расходимости пучка излучения

Рис. 12. Схема измерения диаметра пучка лазерного излучения по радиальному распределению плотности излучения

Рис. 13. Зависимость мощности излучения от уровня PWM

Измерение мощности излучения проводилось в нефорсированном режиме автогенератора с импульсной мощностью порядка 500 Вт и при давлениях газовой смеси 70, 80, 85, 90 и 100 Торр (см. диаграмму). Использовалась газовая смесь с составом 6 CO₂, 3.75 N₂, 25 He, 2 Xe. Величина оптимального давления в макетном образце лазера составила 80 мм рт. ст., что типично для волноводных лазеров с диаметром канала порядка 3 мм и близко к инварианту $pd=250$, где p [мм рт. ст.] – давление, d [мм] – диаметр разрядного канала (рис.14).

Рис. 14. Зависимость мощности излучения от давления газовой смеси

С помощью измерителя Pirocam-3 были получены параметры лазерного луча. Результаты измерений имеют некоторое отклонение от теории. Измеритель также определил астигматизм луча $(Z_y - Z_x)/Z_{rr} = 7.6\%$, асимметрию перетяжки $2W_y/2W_x = 0.981$ и асимметрию расходимости $\Theta_y/\Theta_x = 1.004$. Кроме этого, была измерена мощность излучения, проходящего через диафрагму $d=12$ мм, на расстоянии 800 мм от лазера. Ее величина составила 22 Вт при падающей на диафрагму мощности 21 Вт.

Для оценки степени поляризации излучения макетного образца лазера использовались непросветленная пластина из селенида цинка и измеритель мощности лазерного излучения. Пластина устанавливалась на пути лазерного луча и наклонялась в вертикальной плоскости под углом Брюстера 67.4° . Измерения мощности излучения проводились при 20% PWM. В такой схеме излучение с вертикальной поляризацией проходит через пластину полностью, не отражаясь от нее. Излучение с горизонтальной поляризацией делилось ею на две части. Одна часть проходила сквозь пластину, а другая часть отражалась пластиной. Показано, что излучение лазера эллиптически поляризовано с преобладанием вертикальной поляризации.

Данные экспериментальные результаты подтверждают предварительные оценки, за исключением уровня мощности лазерного излучения. Это связано с дополнительными потерями в Z-образном разрядном канале-волноводе из-за недостаточного качества

обработки его внутренней поверхности. Для снижения потерь можно использовать специальные фрезы и нанесение алюмооксидного покрытия методами напыления.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены и обоснованы конструктивные особенности и технологические режимы на всех стадиях изготовления нового поколения CO₂-лазера с поперечным ВЧ-возбуждением.

На основе анализа патентов и 3D-методов проектирования осуществлены разработка и изготовление отечественного малогабаритного цельнометаллического волноводного CO₂-лазера с поперечным ВЧ-возбуждением с использованием отечественных алюминиевых профилей, по параметрам превышающего зарубежные аналоги.

3D-прототипирование позволило разработать конструкторско-технологическую документацию для мелкосерийного производства нового поколения современных цельнометаллических изделий, использующих в своей конструкции отечественные алюминиевые профили (прокат).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Witte man W.J.* The CO₂ Laser. Textbook 1987.
2. *Карлов Н.В.* Лекции по квантовой электронике. Учебное пособие. Москва: Наука, 1983.
3. *Погорельский С.Л.* РФ Патент 2065238, 1996.
4. *Laakmann P.* USA Patent 4805182, 1989.
5. *Vitrus P., Broderick J.A.* USA Patent 5953360, 1999.
6. *Паюров А.Я., Кюн В.В., Румянцев Р.С., Степанов В.А., Федоров М.А.* // Сб. тезисов II Всеросс. научно-практ. конфер. “Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве”. Рязань: РГУ им. С.А. Есенина, 2020. С. 94.
7. *Паюров А.Я., Кюн В.В., Румянцев Р.С., Степанов В.А., Федоров М.А.* // Труды XXVIII Межд. конф. “Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и на транспорте. 2020”. Новороссийск: НГПУ, 2020. С. 18.
8. ТУ 6-06-20-88 Пленка клеевая марки ПКС-171 2008.
9. *Петрова А.П.* Клеящие материалы. Справочник / Под ред. Е.Н. Каблова, С.В. Резниченко. Москва: “Каучук и резина”, 2002.
10. *Лазутин Ю.Д., Сускин В.В., Шевченко В.Ф.* Технология машиностроения: учеб. пособие / Под ред. Ю.М. Солдака. Рязань: РГРТУ, 2008.
11. *Rosebury F.* Handbook of electron tube and vacuum techniques. Massachusetts, 1964.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Вариант Z-образной разрядной структуры.
- Рис. 2.** Собранная разрядная структура 3D и корпус (бокс).
- Рис. 3.** 3D-модель и 2D-чертеж жидкостного радиатора.
- Рис. 4.** Фланцы с узлами юстировки (2D- и 3D-изображения) силовых транзисторов.
- Рис. 5.** 3D-модель высокочастотного драйвера.
- Рис. 6.** Бокс с разрядной структурой.
- Рис. 7.** Герметичный бокс с оптической системой.
- Рис. 8.** Направление движения тепловых потоков.
- Рис. 9.** Направление тепловых потоков при жидкостном охлаждении.
- Рис. 10.** Блок-схема экспериментальной установки для измерения энергетических и спектральных характеристик лазерного излучения: 1 – лазер, 2 – источник питания, 3 – система охлаждения, 4 – ослабитель, 5 – измеритель мощности ИМО-4С, 6 – двухкоординатный самописец, 7 – измеритель распределения плотности мощности пучка излучения, 8 – измеритель длины волны излучения (ПАС).
- Рис. 11.** Схема измерения расходимости пучка излучения [4]: 1 – лазер, 1–1, 2–2 – сечения, в плоскостях которых измеряются диаметры пучка излучения, L_1 – расстояние до первого сечения, ΔL – расстояние между двумя сечениями.
- Рис. 12.** Схема измерения диаметра пучка лазерного излучения по радиальному распределению плотности излучения.
- Рис. 13.** Зависимость мощности излучения от уровня PWM.
- Рис. 14.** Зависимость мощности излучения от давления газовой смеси (PWM=100%).

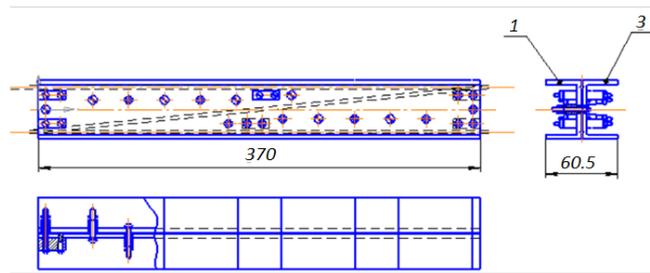


Рис. 1.

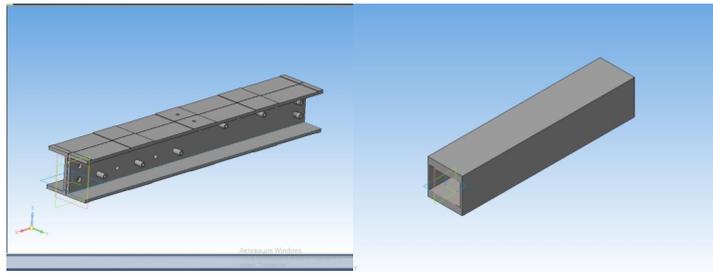


Рис. 2.

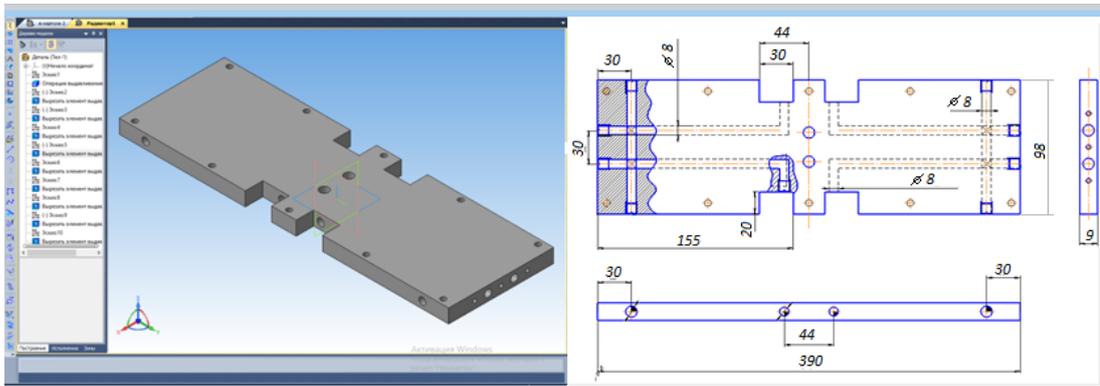


Рис. 3.

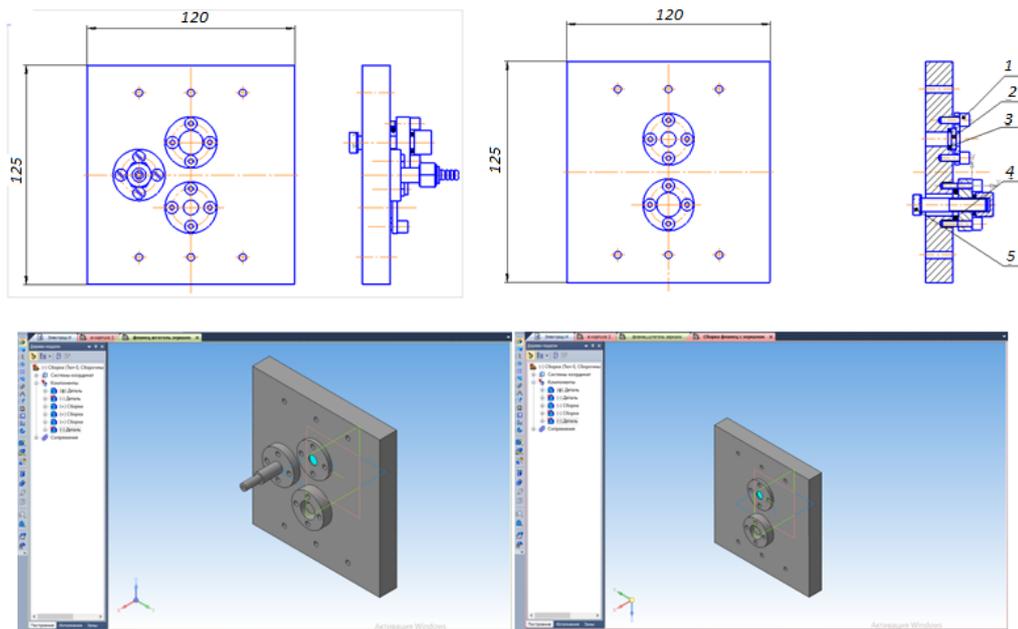


Рис. 4.

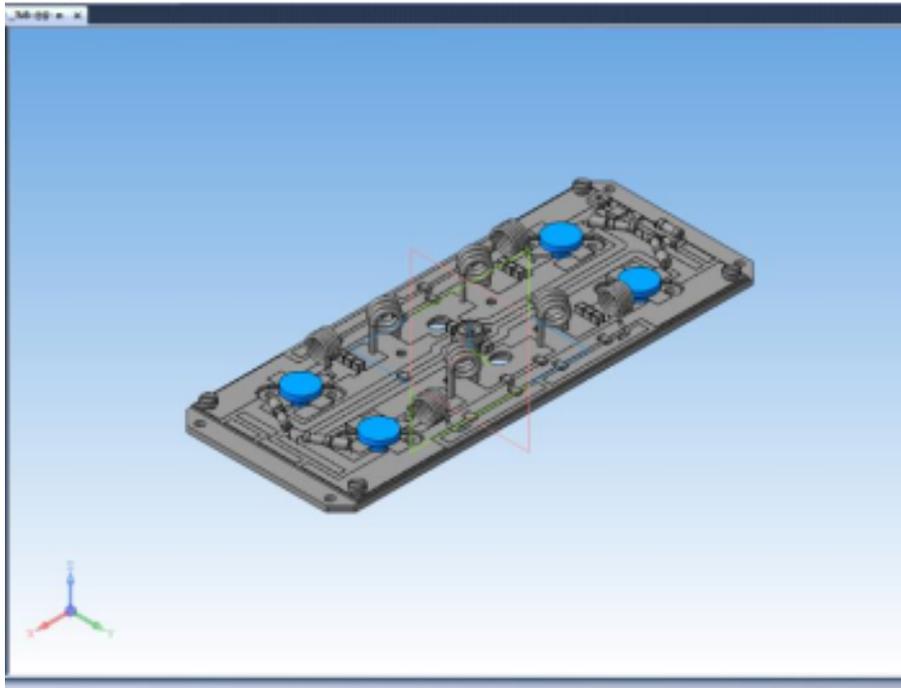


Рис. 5.

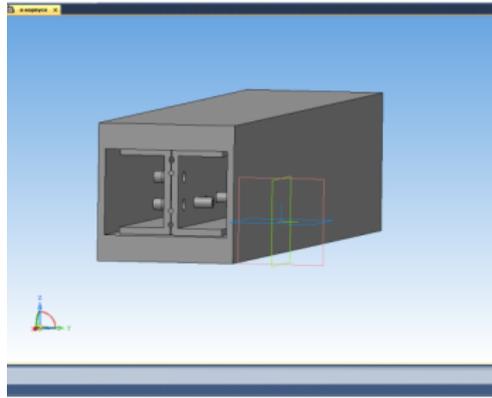


Рис. 6.

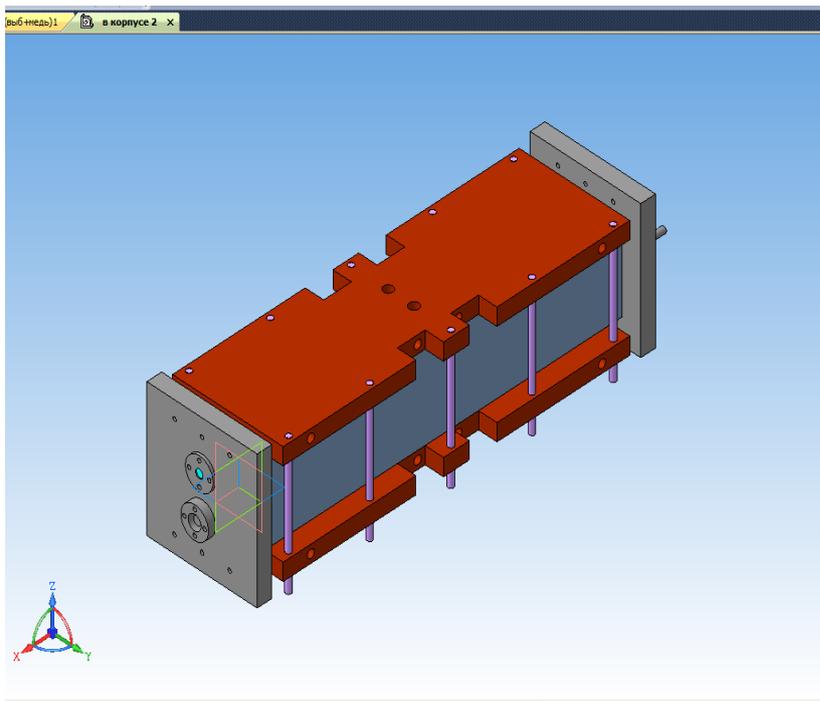


Рис. 7.

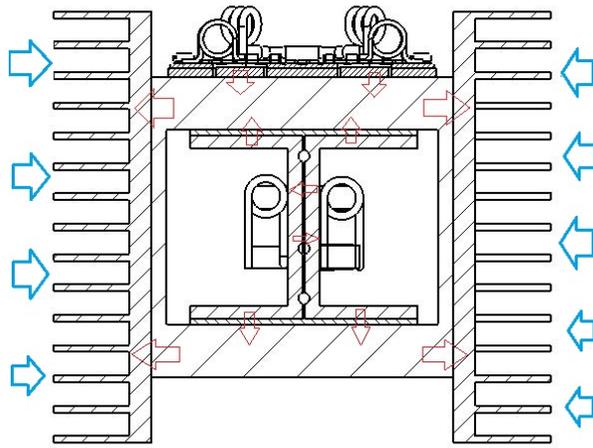


Рис. 8.

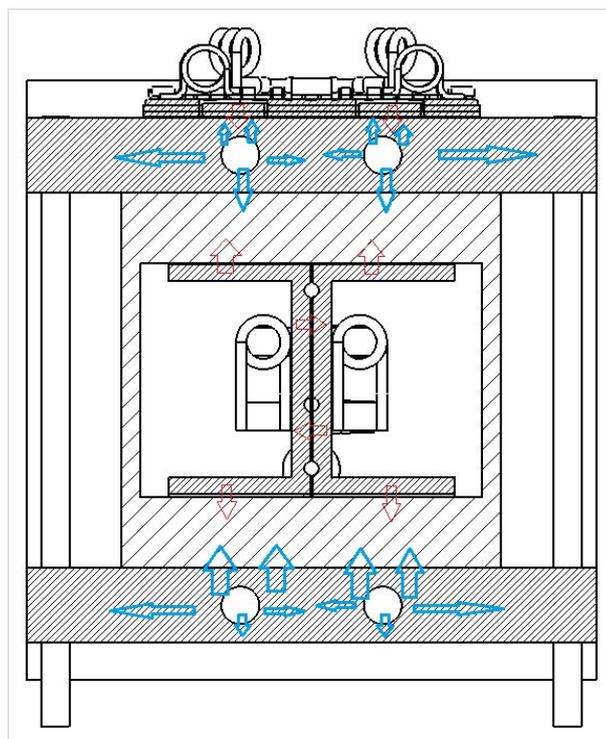


Рис. 9.

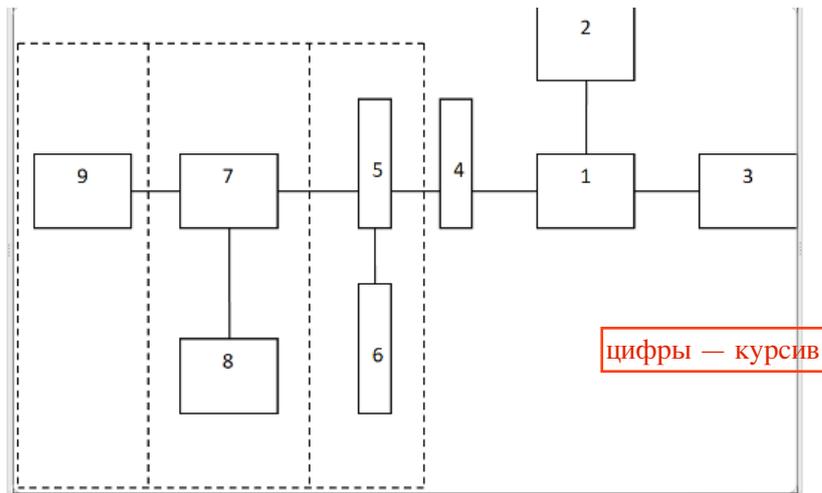


Рис. 10.

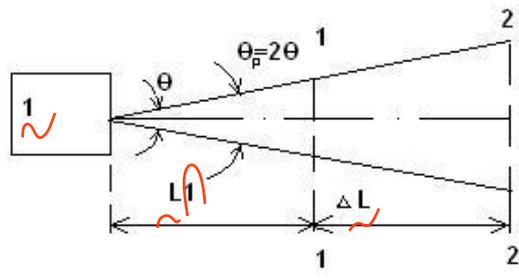


Рис. 11.

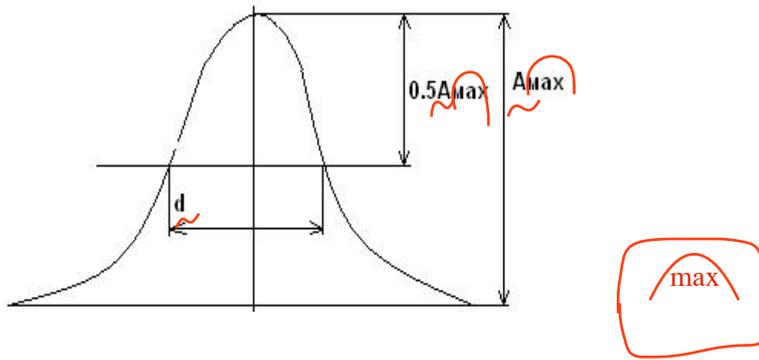


Рис. 12.

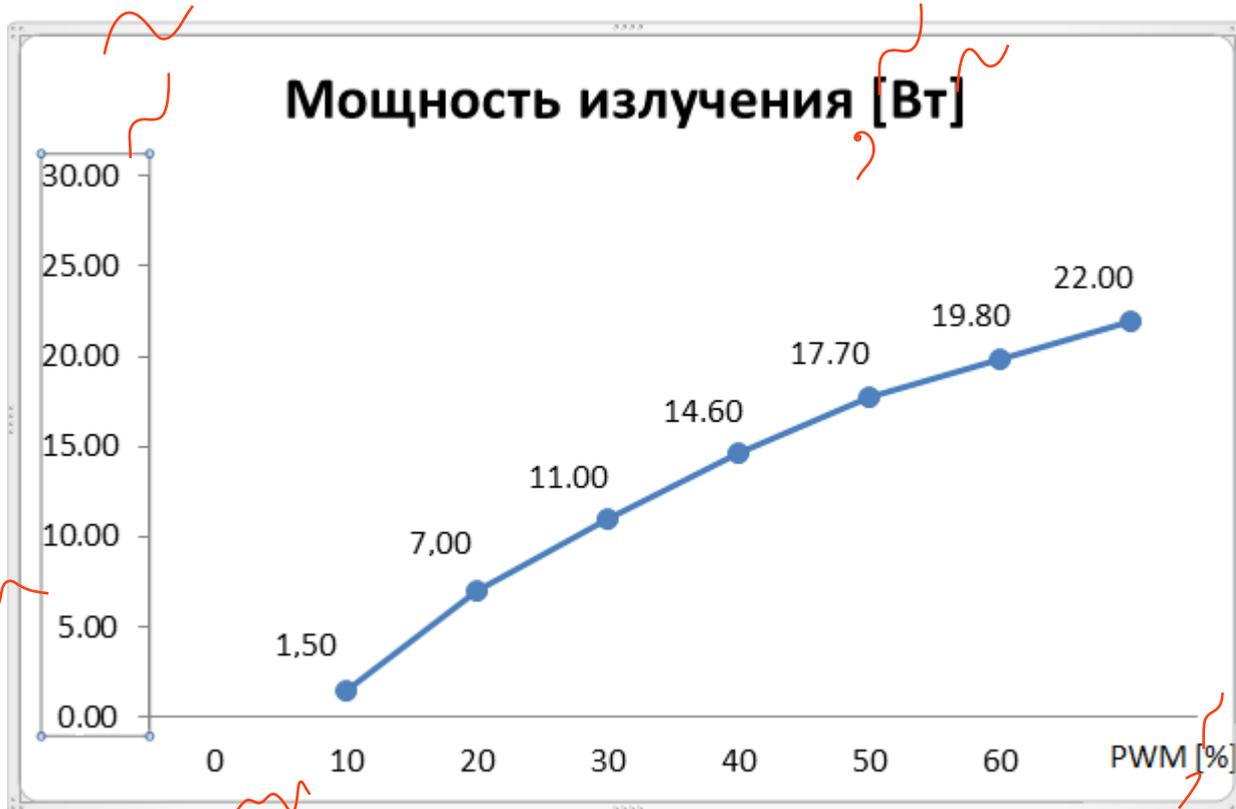


Рис. 13.

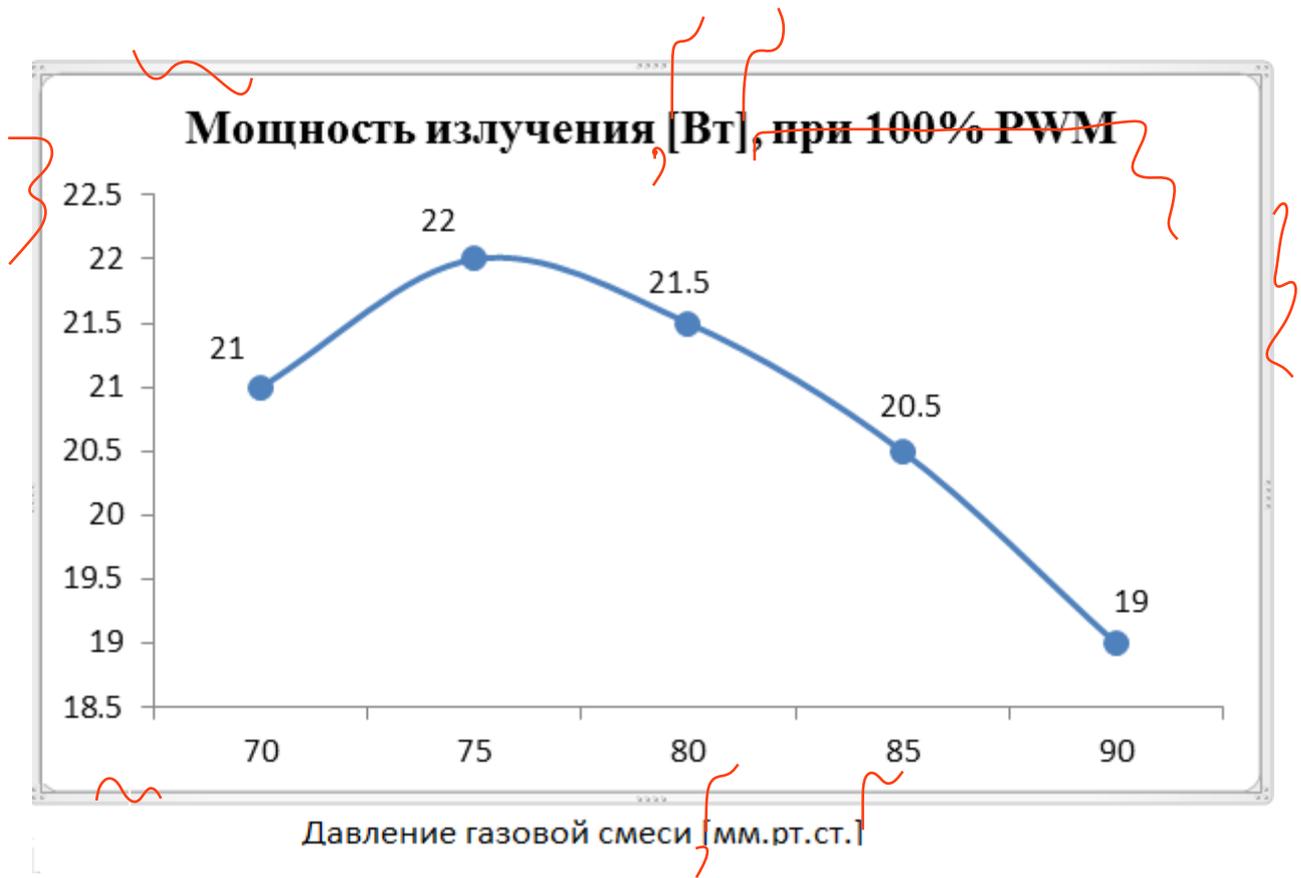


Рис. 14.

~~Для переводчика:~~

~~**3D design of an all-metal waveguide CO₂ laser with transverse rf excitation**~~

~~The work is devoted to the 3D design of an all-metal waveguide CO₂ laser (elements and the entire device), the design of which is made using domestic precision aluminum profiles. A 3D view of the individual nodes and the entire laser is shown. The schemes of air and water cooling, the technology of assembling and sealing a CO₂ laser using laser (plasma) welding and adhesive joints, which ensure high quality and reliability of the device, are described.~~