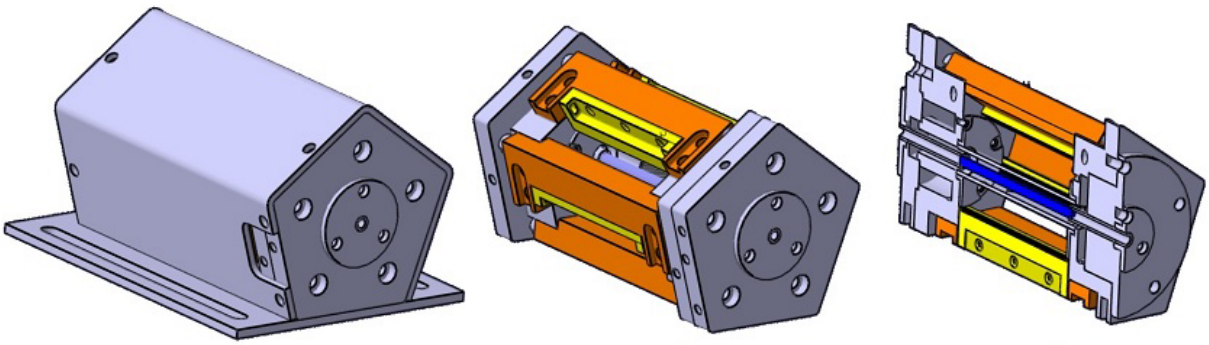
ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТОК ПО СОЗДАНИЮ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ (КВАНТРОНЫ)

В. Х. Багдасаров, В. В. Букин, С. В. Гарнов, Н. А. Кудашева, Б. Д. Овчаренко, А. А. Сироткин, В. Б. Цветков

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, г. Москва

В мире существуют несколько крупных фирм, которые занимались довольно продолжительное время и занимаются по сей день производством квантронов с диодной накачкой в промышленном масштабе. Данная работа посвящена проектированию и созданию квантронов с диодной накачкой (рис. 1) как опытных образцов с дальнейшей их реализацией и подготовке к серийному производству [1], а также будут даны некоторые сведения по результатам предварительных испытаний.



а б в

Рис. 1. Разрабатываемый квантрон в CAD программе: а – квантрон в сборе; б – квантрон в сборе без основания и крышки; в – квантрон в разрезе (развернуто)

Целью работы является разработка и изготовление квантронов на отечественной элементной базе.

Исходя из поставленных в техническом задании требований (выходная энергия ~700 мДж, коэффициент усиления среды ~ 60) просчитывалась оптическая модель накачки активного элемента квантрона. Важными аспектами программного оптического расчета были [2]:

- выбор схемы расположения решеток лазерных диодов вокруг и вдоль активного элемента;
- нахождение оптимальных значений расстояний от центра активного элемента до излучающих поверхностей решеток лазерных диодов и габаритные области свечения;
- определение направления излучения линеек у решеток лазерных диодов (направление быстрой и медленной осей относительно оси активного элемента);
- соотношение всех геометрических размеров излучающих и засвеченных деталей между собой для достижения максимальной эффективности выбранной схемы.

Изделие состоит из небольшого количества деталей (рис. 2), в основном, из латунного сплава. Так как решетки лазерных диодов в момент поставки идут уже со своими медными основаниями, которые подразумевают крепление механическим путем, теплообменники, на которые и крепятся эти решетки лазерных диодов, следует делать из меди (М1, М2, М3…).

Конструкция представляет собой два базовых фланца, входной фланец (поз.1) и распределительный фланец (поз.4), к которым крепится кварцевая трубка (поз.5), внутри которой находится активный элемент (поз.6), с помощью двух внутренних крышек (поз.11). Решетки лазерных диодов (поз.3) крепятся к теплообменникам (поз.2) механическим путем через пластину теплового контакта из индия, т.к. здесь находится основной источник выделения тепла, а протоки охлаждающей

жидкости проходят именно в теплообменниках. Далее теплообменники крепятся к базовым фланцам. Затем все это «глушится» с двух сторон прижимными фланцами, 5-угольный (поз.7) и цилиндрический (поз.8). Фланцы поджимаются торцевыми крышками (поз.9), в которых закрепляется активный элемент. Основание (поз.10) служит для закрепления изделия на столе и для регулировки нужной высоты центральной оси активного элемента под всю оптическую систему. Для уменьшения стоимости изделия активный элемент имеет длину чуть больше длины засветки и крепится в цангах [3]. Общий вид изделия в разборном варианте представлен на рис. 3.

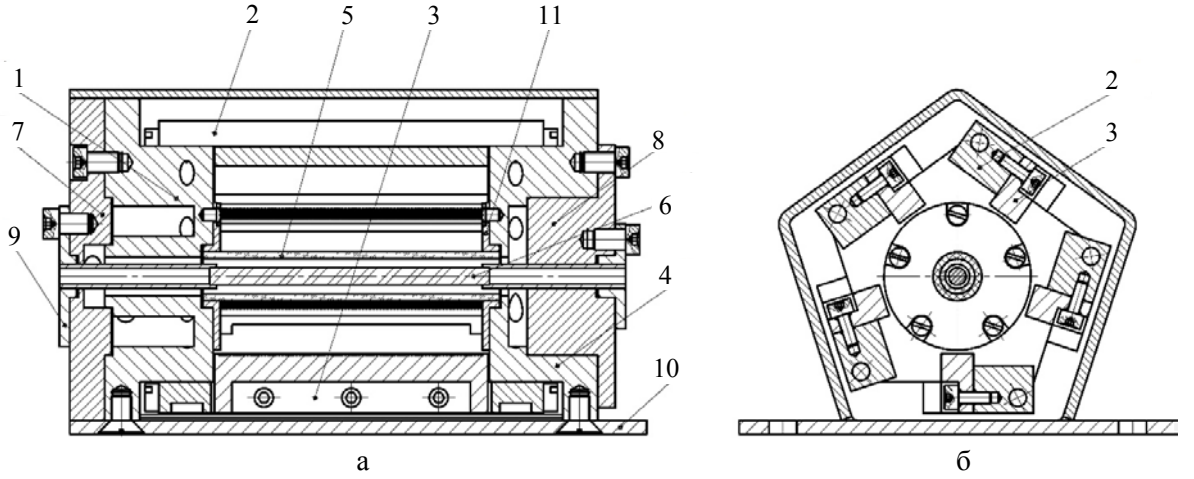


Рис. 2. Сечения в сборке: а – продольное сечение; б – поперечное сечение

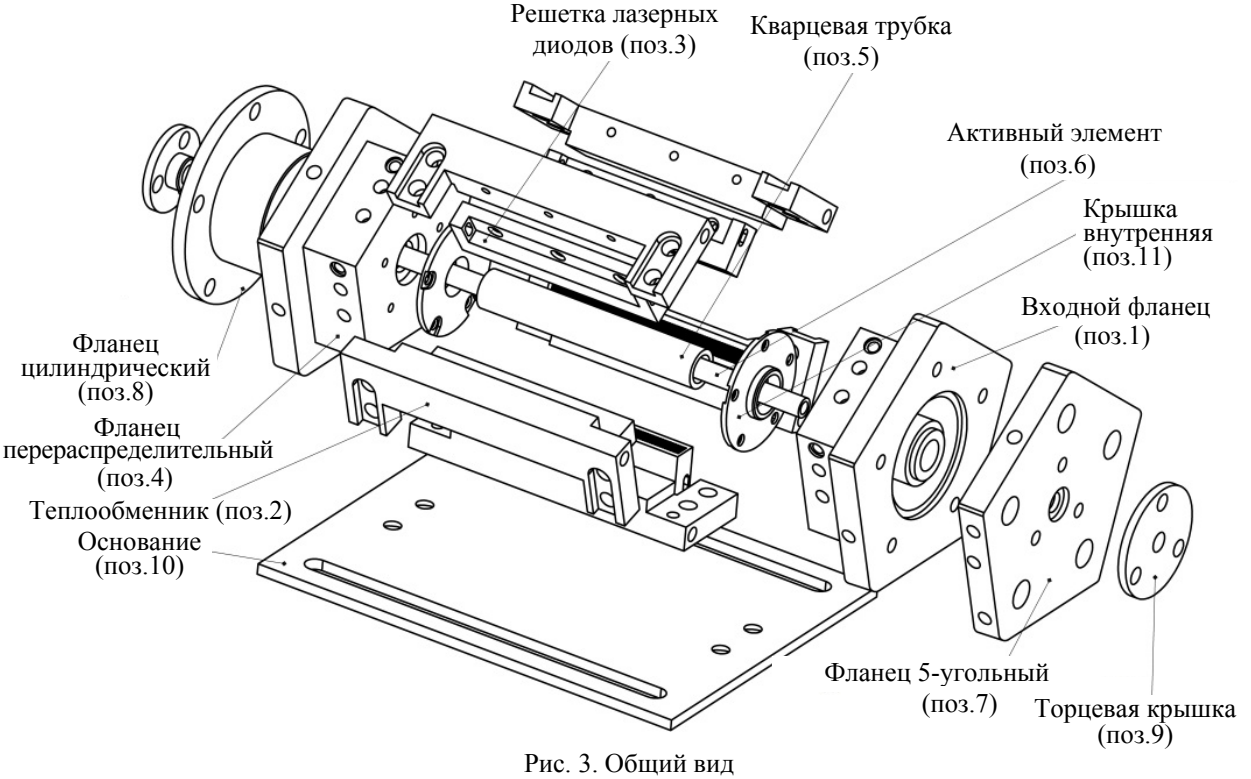


Рис. 3. Общий вид

В квантроне предусмотрена система охлаждения, которая представляет собой один замкнутый контур (рис. 4). В деталях изделия существуют отверстия и канавки, через которые определенным образом протекает хладагент. Хладагентом здесь может являться дистиллированная вода. Прокачка охлаждающей жидкости осуществляется с помощью чиллера. Температурный диапазон хла-

дагента лежит в пределе 18…32 °С. Вообще, соблюдению температуры стоит уделить особое внимание, т. к. от нее зависит длина волны излучения накачки, которая в свою очередь, влияет на выходные параметры, например, на энергетику. Рабочая длина волны накачки 806±3 нм. Следует соблюдать и режим работы решеток лазерных диодов по их паспортным данным. Во-первых, в нашем случае режим должен быть импульсным; во-вторых, частота следования импульсов не должна превышать 25 Гц, а их длительность – 250 мкс; в-третьих, максимальное значение тока не должно превышать 45 А. В результате превышения по каким-либо причинам этих пиковых значений можно запросто вывесит из строя всю электрическую составляющую изделия и «выбить» отдельные линейки у решеток лазерных диодов или же вовсе привести все матрицы в негодность. Следует учитывать и тот факт, что при определенных перепадах температур может возникнуть конденсат на рабочих поверхностях изделия, например, на решетках лазерных диодов, что является недопустимым.

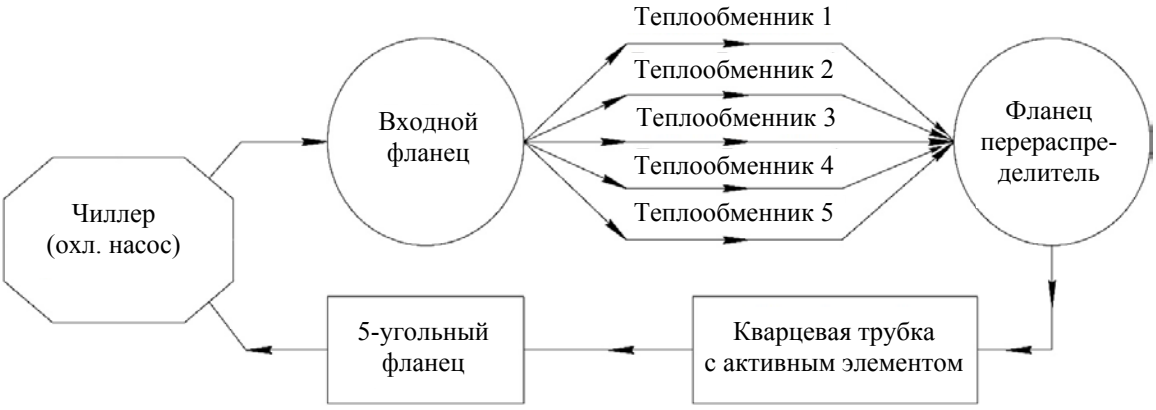


Рис. 4. Схема системы охлаждения

На рис. 4 представлена схема параллельно-последовательного охлаждения. Хладагент из чиллера поступает через входной патрубок во входной фланец, затем распространяясь параллельно по пяти теплообменникам, к которым механически прикреплены источники выделения тепла (решетки лазерных диодов) через пластину теплового контакта из индия для улучшения теплопередачи от разъемных деталей, сливается в перераспределительный фланец. Из фланца хладагент поступает в кварцевую трубку, в которой находится второй источник выделения тепла (активный элемент). Далее охлаждающая жидкость попадает в 5-угольный фланец и через выходной патрубок поступает обратно в чиллер.

Одноконтурная схема параллельно-последовательного охлаждения объясняется принципом работы квантрона. Первоначальный источник тепла – решетки лазерных диодов, поэтому здесь необходимо учитывать градиент температуры по длине теплообменника, чтобы не было сдвига по длине волны накачки; есть и характерные отличия материалов источников тепловыделений и охлаждаемых деталей, т. к. теплообменники сделаны из меди, обладающей своими значениями теплопроводности и теплоемкости, и активный элемент – Nd:YAG (алюмо-иттриевый гранат легированный неодимом), соответственно.

Совместное решение задачи по гидродинамическому расчету и анализу теплопотерь (рис. 5) дает нам информацию не просто о температурах охлаждаемых деталей, а именно, о градиенте температуры на теплообменнике, где закреплены решетки лазерных диодов. Перепад температуры здесь не должен превышать ±1…2 °С от перовой до последней линейки, т. к. превышение этого диапазона дает сдвиг длины волны от максимума, что в конечном счете повлияет на выходную энергию.

В программе просчитывался максимальный режим работы квантрона на частоте 25 Гц и токе 45 А, поэтому тепловыделения на решетках лазерных диодов составили 50 Вт, а на активном элементе составили 30 Вт. Коэффициент запаса при подсчете тепловыделений использовался – 1,2. Расход охлаждающей жидкости на входе – 5 л/мин, что соответствует использованию достаточно маломощного чиллера. На рис. 6 представлена завихренность траектории потока и температура протекающей в квантроне жидкости.

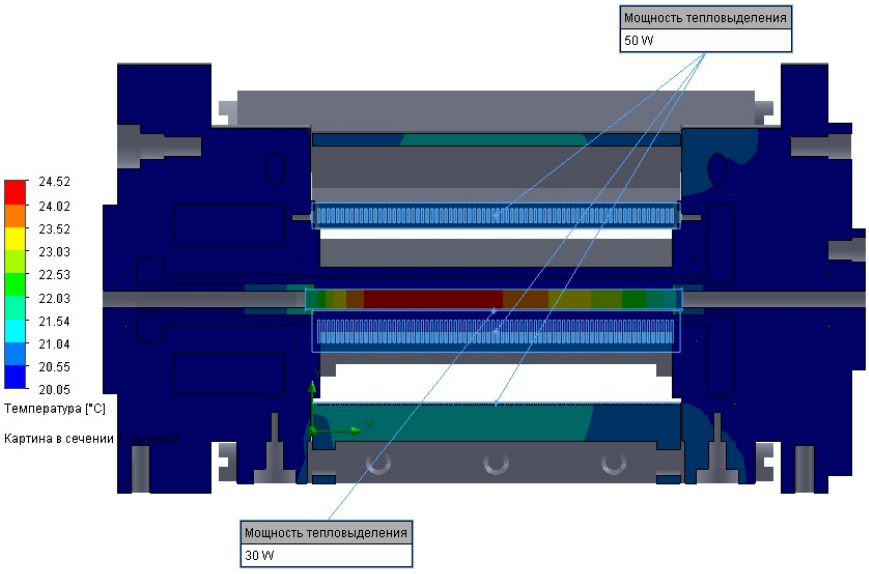


Рис. 5. Картина температур в продольном сечении

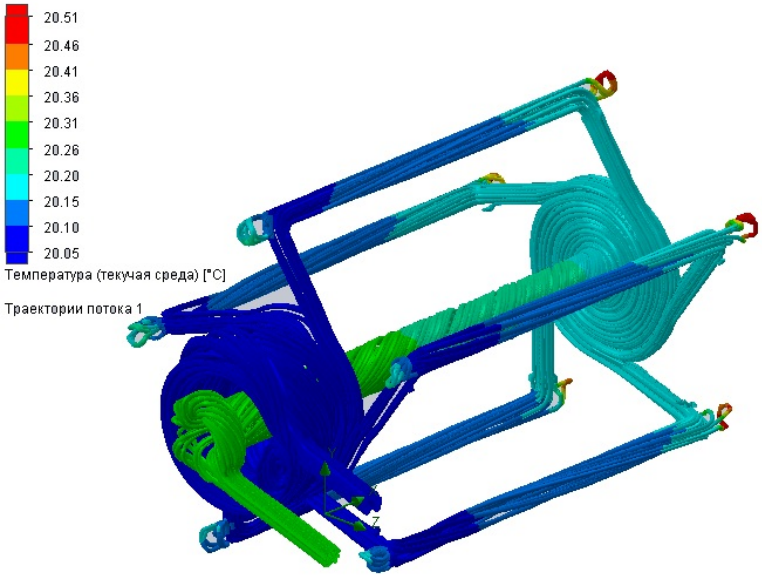


Рис. 6. Траектория потока и температура хладагента

Стенд собирался как для измерения коэффициента усиления среды, так и для измерения энергетики в режиме свободной генерации излучения квантрона (рис. 7).

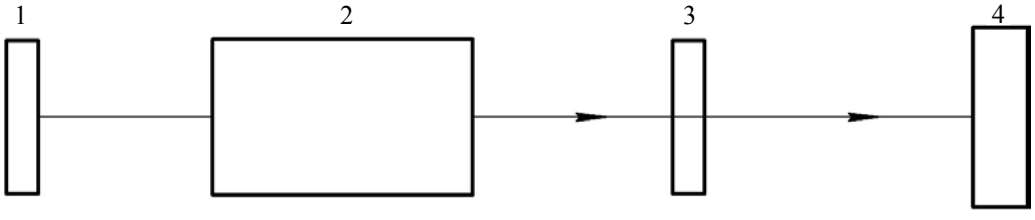
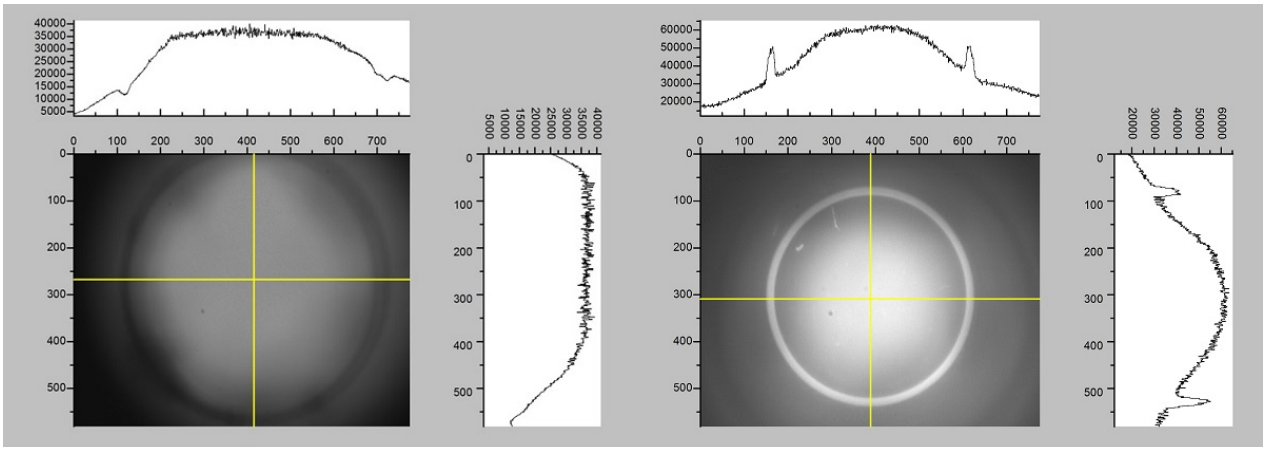


Рис. 7. Стенд для измерения энергии в режиме свободной генерации квантрона: 1 – глухое зеркало (R = 100 %); 2 – квантрон; 3 – полупрозрачное зеркало (R = 14 %); 4 – измеритель энергии/ПЗС-камера

В режиме свободной генерации стенд состоял из самого квантрона, системы зеркал, измерителя энергии или камеры для фотографирования профиля люминесценции квантрона. Использовались два кристалла Nd:YAG (∅5×100 мм) с одинаковой обработкой боковой и торцевых поверхностей, с длиной засветки 75 мм, но с разной концентрацией неодима (рис. 8).



а б

Рис. 8. Профиль люминесценций при разной концентрации неодима в кристалле: а – профиль люминесценции квантрона с диодной поперечной накачкой, ток 20 А, концентрация неодима в Nd:YAG кристалле № 1 – 1 %; б – профиль люминесценции квантрона с диодной поперечной накачкой, ток 10 А, концентрация неодима в Nd:YAG кристалле № 2 – 1,2 %

Распределение люминесценции у кристалла № 1 получается достаточно однородным, и характерное эксцентричное затенение вокруг пятна объясняется небольшой погрешностью при юстировке оптической системы. При использовании кристалла № 2 появляется «засветка» в центре активного элемента, что связано с нехваткой мощности для прокачки кристалла с большей концентрацией неодима. Ареол вокруг пятна связан с наличием крепежных цанг у активного элемента. В табл. 1 представлены результаты измерения выходной мощности при использовании двух кристаллов и разном токе.

Таблица 1

Зависимость выходной энергии от тока накачки

$I_{накачки}$, А	$E_{вых}$, мДж; Кристалл № 1	$E_{вых}$, мДж; Кристалл № 2
10	28	18
15	77	56
20	130	95
25	230	138
30	286	194
35	360	279
40	426	332
45	485	385

Стенд для измерения коэффициента усиления (рис. 9) состоял из задающего генератора, блок питания которого находился в состоянии синхронизации с блоком питания квантрона, поворотного зеркала, самого квантрона, измерителя энергии/ПЗС камеры.

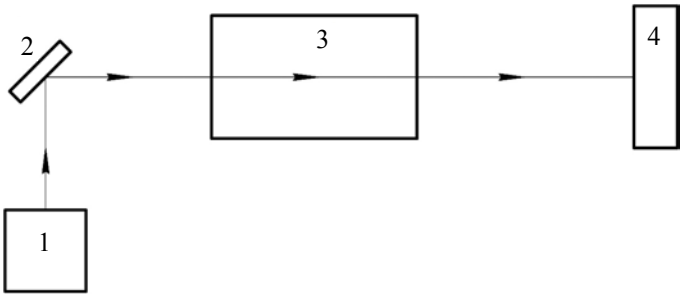


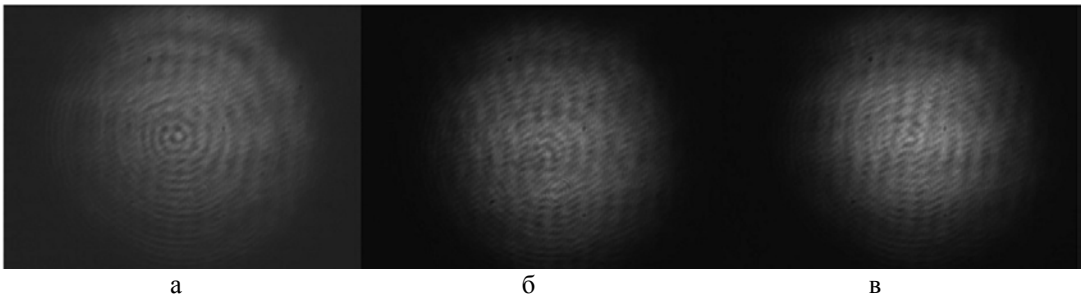
Рис. 9. Стенд для измерения энергии и коэффициента усиления: квантрона: 1 – задающий генератор 2 – поворотное зеркало; 3 – квантрон-усилитель; 4 – измеритель энергии/ПЗС-камера

Таблица 2

Зависимость коэффициента усиления среды от тока накачки

$E_{вх}$, мДж	$I_{накачки}$, А	$E_{вых}$, мДж	Коэффициент усиления, G
0,84	10	2,80	3,333
	15	10,90	12,976
	20	34,60	41,191
	25	53,70	63,929
	45	54,00	64,286
0,62	10	2,07	3,339
	15	8,06	13,000
	20	27,00	43,548
	25	45,40	73,226
	45	45,60	73,548
0,08	10	0,27	3,412
	15	1,10	13,750
	20	4,28	53,500
	25	9,75	121,875
	45	9,60	120,000

При токах уже в 25 А происходит перенасыщение инверсной населенности, что приводит к незначительному изменению коэффициента усиления среды. На рис. 10 представлены профили лазерных пучков без усиления и с усилением при различных значениях тока.



а б в

Рис. 10. Профили лазерного пучка: а – без усиления на выходе из квантрона; б – с усилением лазерного пучка при токе накачки квантрона 20 А; в – с усилением лазерного пучка при токе накачки квантрона 45 А

В итоге, был разработан, создан и испытан прототип квантрона с максимальной выходной энергией ~500 мДж и максимальным коэффициентом усиления ~120. Тем самым, создан приемлемый задел для дальнейшей оптимизации его выходных оптических параметров.

Список литературы

1. Кравцов Н. В. Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой. – Изд-во МГУ, Квантовая электроника. 2001. 31, № 8. С. 661 – 677.
2. Гречин С. Г., Николаев П. П., Шарандин Е. А. Функциональные возможности квантронов твердотельных лазеров с поперечной накачкой. – Изд-во МГТУ им. Баумана, 2014. 26 с.
3. Diehl R. (E. D.). High-power diode lasers. Fundamentals, technology, applications (Freiburg: Springer, 420, 2000).