

УДК 535.621.37; 621.378.325  
DOI: 10.12737/24550

**А.Г. Григорьянц**, д.т.н., **И.Н. Шиганов**, д.т.н.,  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)

**М.А. Казарян**, д.ф.-м.н.,  
(ФИ РАН им. П.Н. Лебедева, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53),

**Н.А. Лябин**, д.т.н.  
(АО «НПП «Исток» имени А.И. Шокина», 141190, Московская область, г. Фрязино, Вокзальная ул., д.2а)  
E-mail: mt12@bmstu.ru, lilt@istokmw.ru, kazarmishik@yahoo.com

## **Возможности прецизионной микрообработки материалов импульсным излучением лазера на парах меди**

*На основе исследований по обработке материалов импульсным излучением лазера на парах меди созданы современные лазерные технологические установки типа «Каравелла» для прецизионной микрообработки фольговых и тонколистовых металлических и большого ассортимента неметаллических материалов.*

**Ключевые слова:** лазер на парах меди; плотность пиковой мощности; прецизионная микрообработка материалов; лазерная технологическая установка для микрообработки; зона термического влияния; шероховатость поверхности реза.

**A.G. Grigoriyants**, D. Eng., **I.N. Shiganov**, D. Eng.  
(Bauman STU of Moscow, Building 1, 5, 2-d Baumanskaya Str, Moscow 105005)

**M.A. Kazaryan**, D. P-M.,  
(Lebedev FI RAS, 53, Leninsky Avenue, 119991 GSP-1 Moscow)

**N.A. Lyabin**, D. Eng.  
(J-S Co. "Shokin Scientific-Production Enterprise "Source", 2a, Vokzalnaya Str., Fryazino, Moscow Region 141190)

## **Possibilities of precision material micro-processing by laser pulse copper-vapor radiation**

*The paper reports the results of experimental researches on microprocessing by laser copper-vapor radiation with wavelengths of radiation in the visible spectrum region of 510.6 and 578.2 nm and the frequency of pulse repetition of 14-15kHz, a nano-second duration of pulses and a peak power density of 109-1011 W/cm<sup>2</sup> in the focused spot light with the diameter of 10...20μm. The investigations carried out became a basis for the creation of modern automated laser technological plants "Caravelle-2" and "Caravelle-2M" and with the average radiation power of 6-8W, an operation field of horizontal XY-table 100x100 and 200x200mm and positioning accuracy on axes ±2μm for the precision micro-machining of foil materials – 0.01-0.2mm; "Caravelle-1" and "Caravelle-1M" with the radiation power of 10-15 20-25 W, an operation field of XY-table 150x150mm for the thin-sheet material micro-processing – 0.3-0.5mm and 0.6-1mm. The productivity of the plants mentioned as compared with common methods including also EEM is by an order and more higher. Material micro-processing with laser nano-second copper-vapor radiation ensures a higher quality of a cut: minor roughness of a cut surface (≥1...3μm) and the area of thermal impact (≤3...5μm) and stratifications and micro-cracks do not appear in such heat-resistant material as molybdenum and tungsten.*

**Keywords:** copper-vapor laser; peak power density; precision material micro-processing; laser technological plant for micro-processing; thermal impact area; roughness of surface cut.

Наиболее высокие требования к лазерному излучению предъявляются при микрообработке. Эта технология широко применяется в радиоэлектронной промышленности и микроэлектронике. В качестве источников излучения для микрообработки наиболее эффективны высокочастотные с нано-, пико- и фемто-секундной длительностью и малой энергией в импульсе и высоким коэффициентом поглощения твердотельные и газовые лазеры видимого и ультрафиолетового диапазонов, в частности, импульсные лазеры на парах меди (ЛПМ).

Эти лазеры с длинами волн излучения в желто-зеленой области спектра – 510,6 и 578,2 нм, наносекундной длительностью импульсов – 10...30 нс, высокими частотами повторения импульсов – 10...20 кГц и низкой импульсной энергией – 0,1...10 мДж остаются мощными импульсными источниками когерентного излучения и по совокупности параметров являются уникальными инструментами для микрообработки [4].

### Исследования по микрообработке наносекундным излучением ЛПМ

На первом этапе исследований по микрообработке был проведен расчет пороговой плотности пиковой мощности испарения для большой группы металлических и неметалли-

ческих материалов, широко применяемых в современном производстве ИЭТ. К ним относятся высокотеплопроводные металлы: медь, алюминий, золото, серебро и тугоплавкие: молибден, вольфрам и тантал, никель, нержавеющая сталь, кремний, поликристаллический алмаз, сапфир, керамика и др.

Расчеты проводились по формуле (1), используемой во многих технологических работах, учитывающей основные теплофизические и оптические свойства материалов [5, 6].

$$\rho_u = \frac{kT_u}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{\delta\tau}}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $T_u$  – температура испарения (кипения);  $A = 1-R$  – коэффициент поглощения ( $R$  – коэффициент отражения);  $\delta$  – коэффициент температуропроводности;  $\tau$  – длительность импульса лазерного излучения.

Для импульсных ЛПМ, применяемых в АЛТУ «Каравелла», значение длительности импульсов для расчета по формуле (1) берется по полувысоте, т.к. импульс имеет форму, близкую к треугольной, и равно  $10^{-8}$  с. Все данные для расчета и расчетные данные по пороговой плотности испарения приведены в табл.1.

### 1. Основные теплофизические и оптические параметры, пороговые плотности пиковой мощности испарения и соответствующие им средние мощности излучения ЛПМ для теплопроводных и тугоплавких металлов

№ п/п	Материал	Температура испарения (кипения) $T_u$ , К	Коэффициент поглощения $A$	Коэффициент теплопроводности $k$ , Вт/(м·К)	Коэффициент температуропроводности ( $\delta$ ), см <sup>2</sup> /с	Пороговая плотность мощности $\rho_u$ , 10 <sup>9</sup> Вт/см <sup>2</sup>	Пороговая средняя мощность ЛПМ $P_{cp}$ , мВт при $d = 10$ и 20 мкм	
Теплопроводные материалы								
1.	Cu	2840	0,368	401	1,17	0,25	30	120
2.	Au	3080	0,15	317	1,28	0,5	60	240
3.	Al	2792	0,086	236	0,938	0,7	80	320
4.	Ag	2485	0,045	429,5	1,74	1,6	190	750
Тугоплавкие материалы								
1.	Ta	5731	0,59	55,2	0,237	0,1	12	36
2.	Mo	4885	0,41	140	0,54	0,21	24	96
3.	W	5828	0,484	162,8	0,64	0,22	26	104
Нержавеющая сталь								
	Сталь	3000	0,5	32	0,035	0,09	11	43
Никель								
	Ni	3005	0,384	90,4	0,229	0,13	15	60
Кремний и искусственный поликристаллический алмаз								
1.	Si	3543	0,5	150	1,48	0,08	9	36
2.	Алмаз	4273	0,15	1600	7	1,5	180	720

С другой стороны, для реализации практических работ, необходимо знать реальные значения мощности излучения ЛПМ. Для этого дополнительно пользуются формулой расчета плотности мощности импульсного излучения (2) для реальных режимов работы:

$$\rho_u = \frac{P_{cp}}{f \cdot \tau \cdot S}, \quad (2)$$

где  $P_{cp}$  – средняя мощность лазерного излучения;  $f$  – частота повторения импульсов;  $\tau$  – длительность импульсов излучения по полувысоте;  $S = \pi d^2/4$  – площадь светового пятна сфокусированного лазерного пучка ( $d$  – диаметр светового пятна).

Из формулы (2), зная  $\rho_u$ , определяется пороговая (минимальная)  $P_{cp}$  ЛПМ, необходимая для микрообработки материала в испарительном режиме:

$$P_{cp} = \rho_u f \tau \pi d^2. \quad (3)$$

В автоматизированных лазерных технологических установках (АЛТУ) типа «Каравелла» с частотой повторения импульсов  $f = 14...15$  кГц используются ахроматические объективы с фокусным расстоянием  $F = 100, 150$  и  $200$  мм, когда диаметр обрабатываемого светового пятна составляет  $d = 10, 15$  и  $20$  мкм.

В табл. 1 приведены пороговые средние мощности излучения ЛПМ для диаметров светового пятна 10 и 20 мкм (последний столбец). Из данной таблицы следует, что пороговые плотности пиковой мощности испарения и со-

ответствующие им средние мощности излучения ЛПМ для теплопроводных и тугоплавких металлов имеют примерно одинаковый уровень и составляют  $(0,1...0,5) \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> и  $10...60$  мВт ( $d = 10$  мкм).

У меди, молибдена и вольфрама эти параметры совпадают, что подтверждается экспериментально одинаковой скоростью обработки при равных значениях мощности излучения ЛПМ. Повышенным уровнем мощности испарения из этой группы материалов выделяются алюминий ( $0,7 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>), серебро ( $1,6 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) и искусственный поликристаллический алмаз ( $1,5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>), а пониженным – кремний ( $0,8 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>). Эти соотношения мощностей подтвердились при практической реализации микрообработки материалов.

Экспериментально показано, что при пороговых (минимальных) уровнях мощности испарения со стороны выхода лазерного луча на материале образуется застывший расплав металла. Последний свидетельствует об образовании в процессе лазерного воздействия большого количества жидкой фазы, что не допустимо при изготовлении качественных прецизионных деталей.

Это наглядно показано на примере сверления отверстий в нержавеющей стали методом прямой прошивки при пороговой плотности мощности испарения  $\sim 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> (рис. 1). Но при увеличении плотности пиковой мощности излучения более чем на порядок, что соответствует средней мощности излучения ЛПМ  $\geq 1$  Вт, отверстия становятся практически идеально чистыми и имеют субмикронную шероховатость (рис. 2).

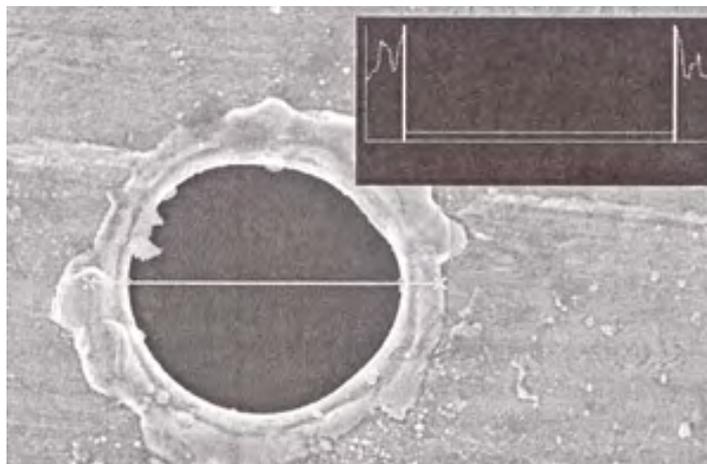


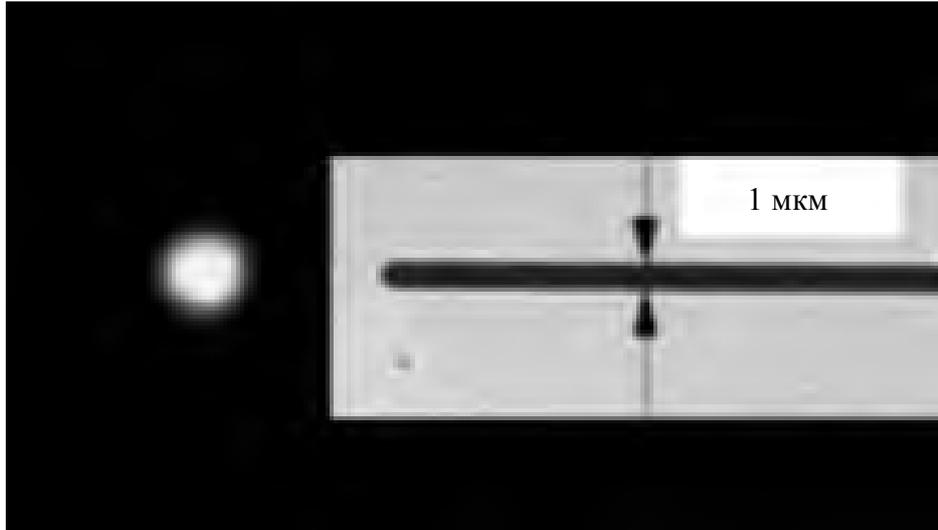
Рис. 1. Изображение отверстия в образце из нержавеющей стали толщиной 50 мкм ( $\times 10^4$ ), сформированного при воздействии излучения ЛПМ с  $\rho_u \sim 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>,  $F = 50$  мм

В результате большого количества экспериментальных исследований установлено, что для обеспечения микрообработки металлических материалов в испарительном режиме с минимумом жидкой фазы и соответственно с высоким качеством необходимо иметь в обрабатываемом световом пятне диаметром 5...20 мкм плотность пиковой мощности на 1 – 2 порядка больше порогового уровня, т.е.  $\rho = 10^{10} \dots 10^{11} \text{ Вт/см}^2$ .

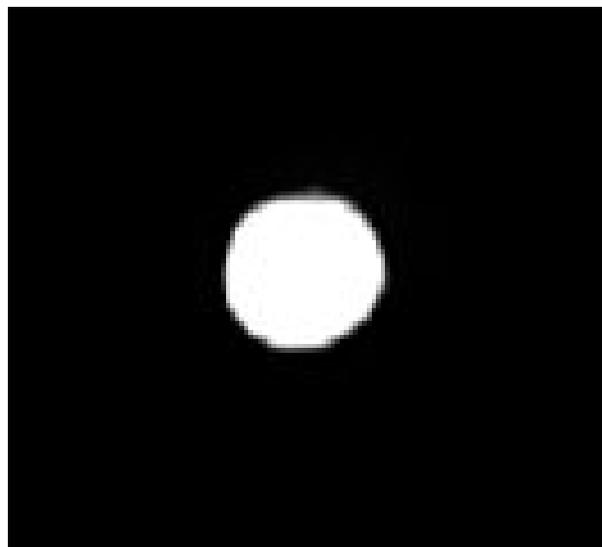
При обработке с таким уровнем плотности

мощности фольговых материалов с толщиной, сопоставимой с шириной реза (10...50 мкм), разлетающиеся в результате микровзрывов из зоны воздействия излучения пары и капли металла практически не встречают преград и полностью удаляются из этой зоны.

При резке материалов с большей толщиной разлет паров металла происходит в основном между стенками уже образовавшегося разреза и возможно увеличение жидкой фазы и ухудшения качества микрообработки.



a)



b)

Рис. 2. Изображения отверстий в образцах из нержавеющей стали толщиной 50 мкм. Плотность пиковой мощности  $\rho = (1,0 \dots 5,0) \cdot 10^9 \text{ Вт/см}^2$ :

a –  $F = 50 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{отв}} = 3,18 \text{ мкм}$  ( $\times 3000$ ); б –  $F = 150 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{отв}} = 15,5 \text{ мкм}$  ( $\times 1000$ )

Дополнительные исследования показали, что как для теплопроводных, так и тугоплав-

ких металлов при толщинах более 1 мм время микрообработки резко возрастает, а качество

снижается. Поэтому излучением ЛПМ с диаметром светового пятна 10...20 мкм, выгодно обрабатывать материалы толщиной не более 1 мм и еще более эффективно применять ЛПМ при толщинах меньше 0,6 мм, когда производительность и качество микрообработки по сравнению с традиционными способами обработки, включая и электро-эрозионную обработку (ЭЭО), на порядок выше (рис. 3).

С толщиной обрабатываемого материала (> 50...100 мкм) в зоне лазерного реза имеет место образование шлака и грата, наличие которых недопустимо в прецизионных деталях для ИЭТ. Для их удаления были разработаны способы химической обработки с наложением ультразвукового поля, которые позволили производить полную и эффективную очистку зоны лазерного реза как для теплопроводных (Cu, Al, Au, Ag), так и тугоплавких (Mo, W, Ta, Re) металлов, их сплавов и ряда других материалов, широко применяемых в ИЭТ.

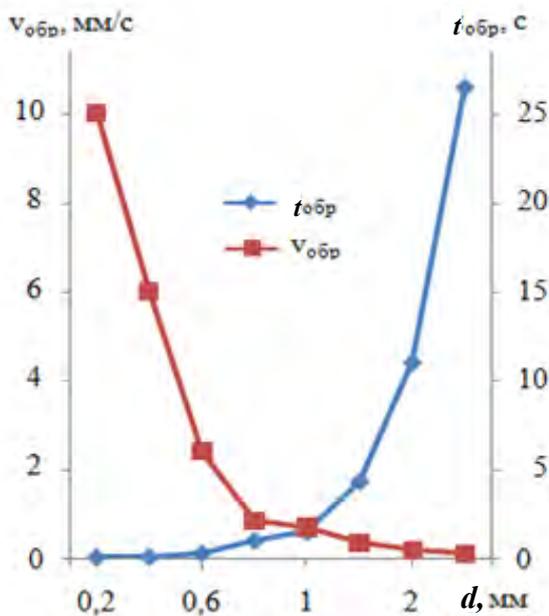


Рис. 3. Зависимости времени ( $t_{обр}$ ) и скорости ( $v_{обр}$ ) прошивки для меди (молибдена) от толщины материала импульсным излучением ЛПМ с диаметром сфокусированного пятна 15 мкм;  $P_{ср} = 20$  Вт;  $f = 8$  кГц;  $\tau = 15$  нс;  $\rho = 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>

На рис. 4 на фрагментах молибденовой и медной деталей, показана последовательность и качество финишной химической очистки.

Экспериментально исследовано, с использованием растровой электронной микроскопии, влияние скорости, числа проходов и мощности излучения при обработке сфокусированным излучением с диаметром

10...20 мкм и плотностью пиковой мощности  $10^{10} \dots 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> на качество поверхности реза: структуру и микротвердость ЗТВ материала [7]. Все исследуемые объекты после лазерной обработки подвергались химической очистке от шлаков. Лазерная резка материалов проводилась с фокусным расстоянием ахроматического объектива 100 и 150 мм при средней мощности излучения 1...10 Вт, скорости обработки  $v = 1 \dots 8$  мм/с и числе проходов  $n = 1 \dots 120$ . Примеры исследований представлены на рис. 5 – 7.

Для молибдена толщиной 0,1; 0,15 и 0,2 мм наблюдается небольшое повышение твердости в зоне, прилегающей к поверхности реза, свидетельствующее о незначительном упрочнении зоны реза.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено:

- поверхность лазерного реза имеет многоканальную структуру с периодом повторения каналов 10...15 мкм и глубиной (шероховатостью) до 3...4 мкм;

- повышение скорости и числа проходов обработки приводит к уменьшению шероховатости поверхности реза до значений менее 1 мкм;

- структурных изменений в прилегающей к лазерному резу зоне (10...20 мкм) не обнаружено и она аналогична центральной зоне материала;

- в высокотеплопроводных металлах упрочнения или разупрочнения материала в прилегающей к лазерному резу зоне (10...20 мкм) не происходит;

- в тугоплавких металлах со значительно более низкой теплопроводностью в прилегающей к лазерному резу зоне (10...20 мкм) происходит незначительное упрочнение.

### Автоматизированные лазерные технологические установки типа «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов

Основные результаты исследований и разработок по созданию промышленных отпаянных импульсных ЛПМ и ЛСПМ, высокоселективных оптических систем по формированию однолучкового излучения дифракционного качества со стабильными параметрами, методов оперативного управления мощностью и (ЧПИ) излучения на основе свойств активной среды (АС) лазера, представленных в работе [4], и результаты выше приведенных исследований по микрообработке наносекунд-

ным излучением стали основой для создания серии современных АЛТУ типа «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов: «Каравелла-1», «Каравелла-1М», «Каравелла-2», «Каравелла-2М» и «Каравелла-2С» [8 – 10].

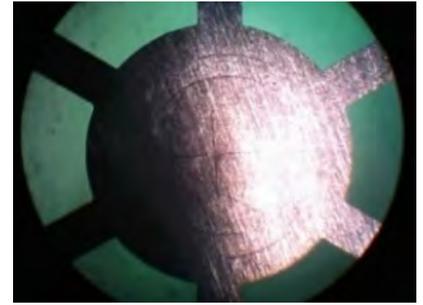
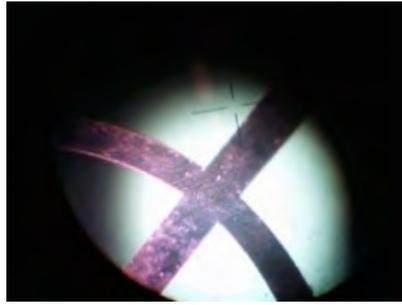
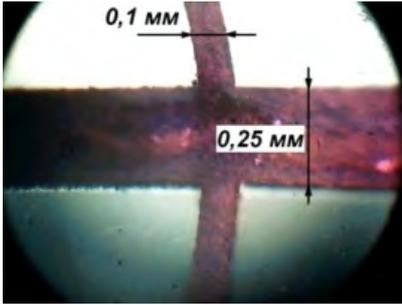
АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» с

диаметром обрабатывающего светового пятна  $10...20 \mu\text{м}$  и плотностью пиковой мощности  $10^9...10^{12} \text{ Вт/см}^2$  при ЧПИ 13,5 и 14 кГц предназначены для производительной и качественной прецизионной микрообработки тонколистовых материалов ИЭТ толщиной  $0,3...0,5 \text{ мм}$  и  $0,6...1,0 \text{ мм}$ , соответственно [9].

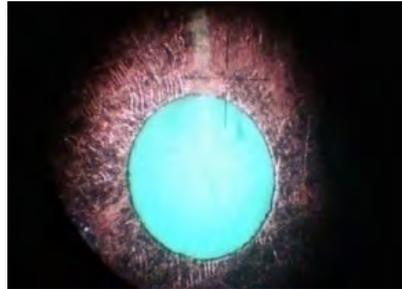
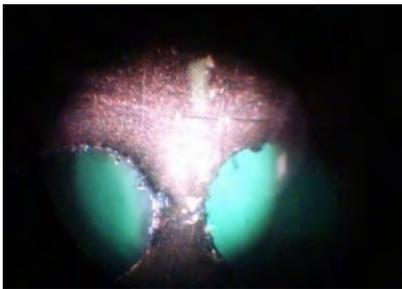
Лазерная обработка

УЗ-обработка

Химобработка

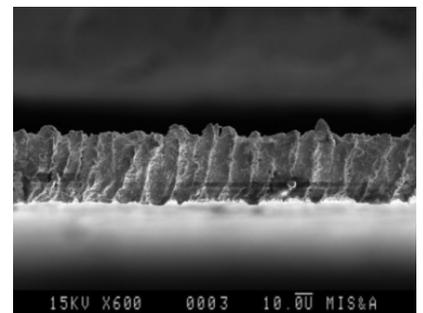
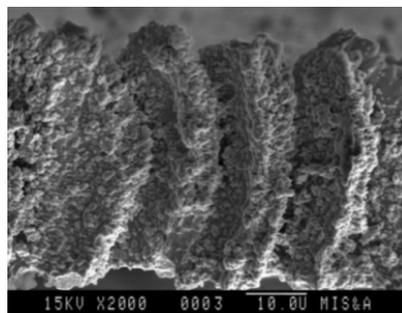
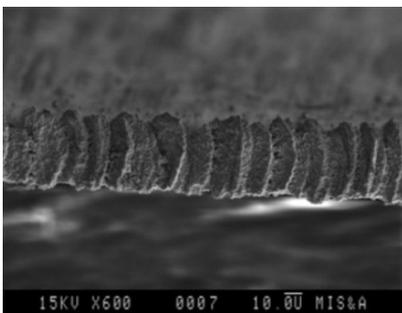


Фрагменты сферической сетки из  $\text{Mo} \neq 0,07 \text{ мм}$



Фрагменты плоской диафрагмы из  $\text{Cu} \neq 0,3 \text{ мм}$

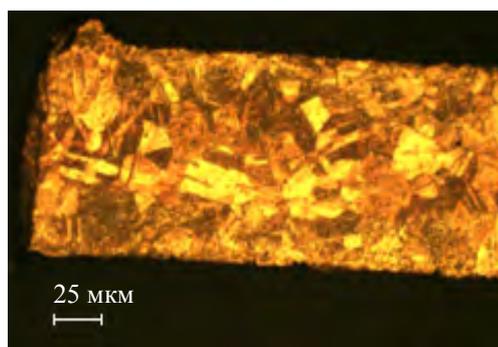
Рис. 4. Этапы технологии изготовления прецизионных деталей при лазерной микрообработке



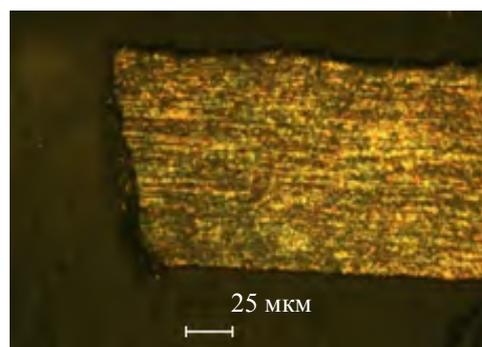
а)  $v = 3 \text{ мм/с}; n = 1$

б)  $v = 7 \text{ мм/с}; n = 3$

Рис. 5. Изображение поверхности реза тантала толщиной  $0,03 \text{ мм}$  при увеличениях: а –  $\times 600$  и  $\times 2000$ ; б –  $\times 600$



а)



б)

Рис. 6. Микроструктура:

а – сплав БрБ2 (0,1мм);  $v = 2\text{мм/с}$ ;  $P_{\text{изл}} = 2,4\text{ Вт}$ ;  $n = 6$ ; б – молибден (0,1мм);  $v = 3\text{мм/с}$ ;  $P_{\text{изл}} = 2,4$ ;  $n = 8$

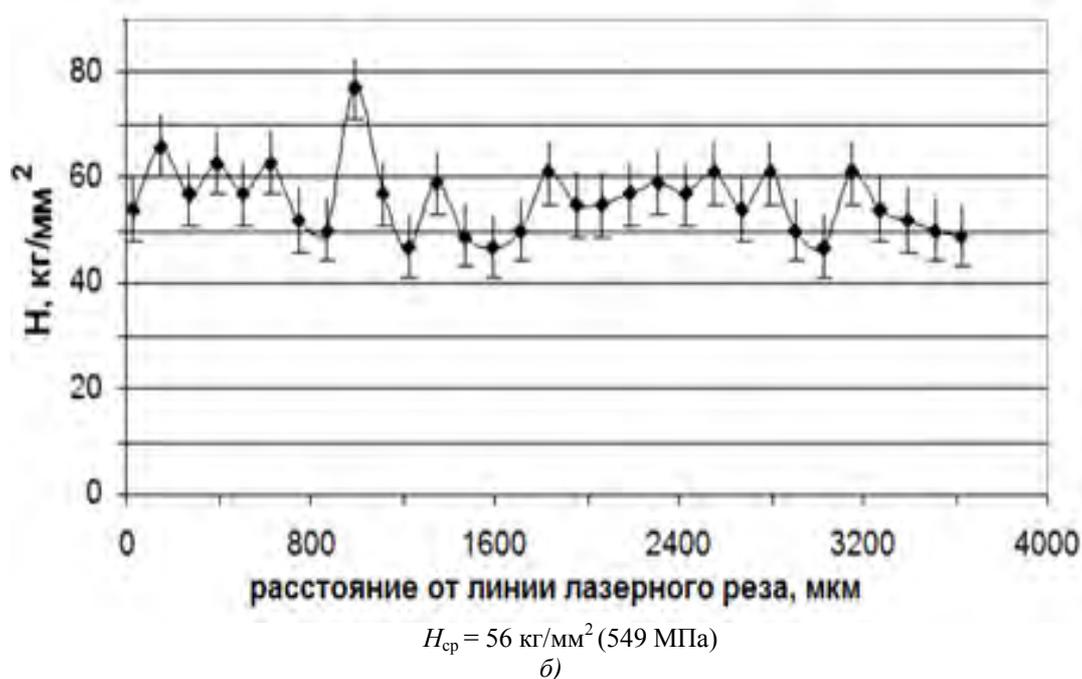
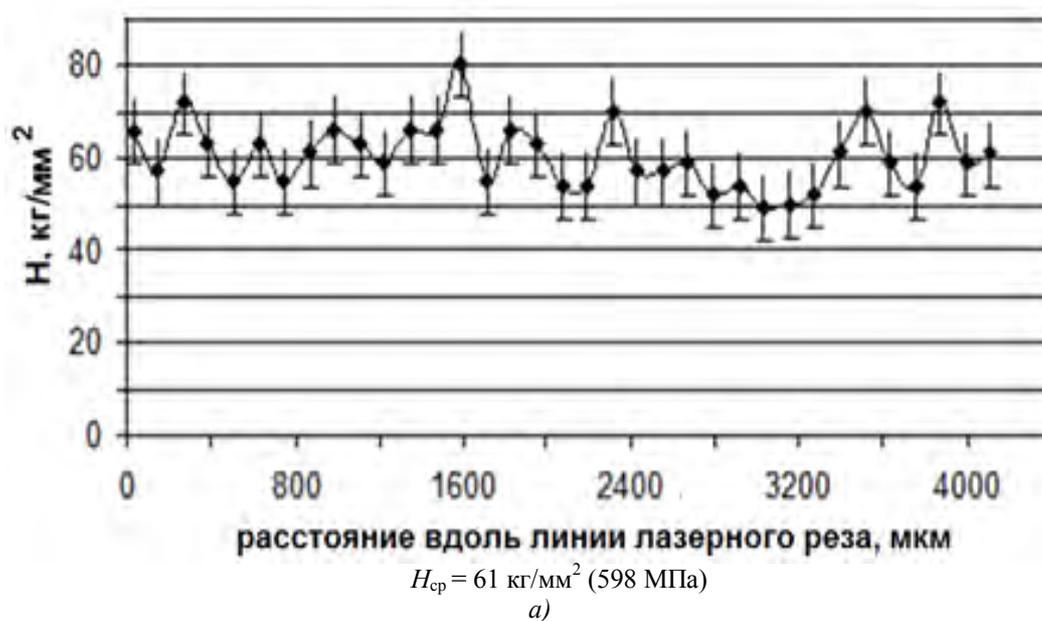


Рис. 7. Изменение микротвердости образца меди МВ толщиной 0,1 мм вдоль (а) и в перпендикулярном направлении (б) от линии лазерного реза:  $P_{\text{изл}} = 2,4\text{ Вт}$ ;  $v_{\text{реза}} = 6\text{ мм/с}$ ;  $n = 3$

В АЛТУ «Каравелла-1» применена промышленная ЛСПМ модели «Кулон-10», работающая по схеме задающий генератор – усилитель мощности (ЗГ – УМ) с телескопическим неустойчивым резонатором (НР) в ЗГ, со средней мощностью дифракционного пучка излучения 10...15 Вт, в «Каравелла-1М» – ЛСПМ «Кулон-20» с НР с двумя выпуклыми зеркалами мощностью 20...25 Вт и используются прецизионные трехкоординатные столы XYZ с точностью позиционирования по осям  $\pm 2$  мкм и рабочим полем горизонтального XY-стола 150x150 мм.

АЛТУ модели «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» с диаметром светового пятна 10...20 мкм и плотностью пиковой мощности  $10^9...10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> при ЧПИ 15 кГц предназначены для прецизионной микрообработки фольговых материалов толщиной 0,01...0,2 мм [10]. В этих установках применены промышленные ЛПМ «Кулон-06» с телескопическим НР средней мощностью излучения 5...8 Вт, трехкоординатные столы XYZ с точностью позиционирования по осям  $\pm 2$  мкм и рабочим полем горизонтального XY-стола 100x100 мм и 200x200 мм, соответственно.

Оптические схемы установок АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» одинаковы, оптические схемы АЛТУ «Каравелла-2» и «Кара-

велла-2М» отличаются от первых лишь отсутствием второго активного элемента (АЭ УМ).

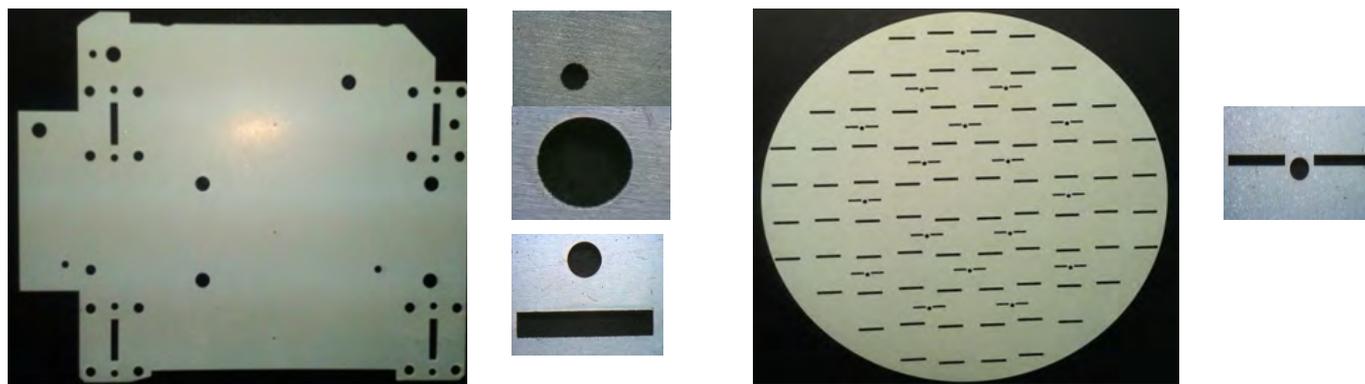
Относительно сложная оптическая система АЛТУ предназначена для формирования однопучкового излучения дифракционного качества, усиления и ослабления, транспортировки, видеонаблюдения и фокусировки на обрабатываемый объект в пятно диаметром 10...20 мкм и плотностью пиковой мощности  $10^9...10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, обеспечивающей эффективную микрообработку в испарительном режиме.

#### Примеры изготовления прецизионных деталей на АЛТУ «Каравелла»

Технологические возможности созданных и эксплуатируемых в производственных условиях промышленных АЛТУ «Каравелла» продемонстрированы на конкретных примерах изготовления прецизионных деталей для конкретных приборов СВЧ-техники и других ИЭТ (рис. 8–14). Детали изготавливаются в соответствии с программами на рабочие чертежи, заданными в конструкторском пакете AutoCAD, при оптимизированных технологических параметрах обработки, к которым относятся фокусное расстояние объектива, средняя мощность излучения, длина волны, плотность пиковой мощности, скорость и число проходов обработки.



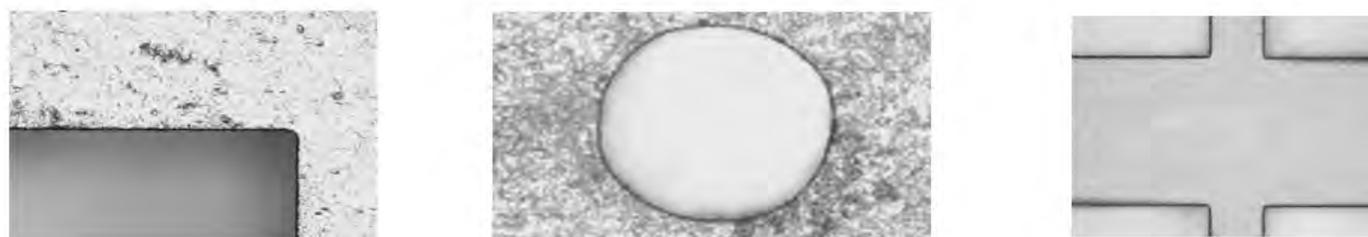
Рис. 8. Сетка из 50 мкм молибденовой фольги с 50 мкм перемычками и прозрачностью 96,3 % (650 ячеек размером 2x1 мм), изготовленная на АЛТУ «Каравелла-2». Режим обработки:  $F_{\text{объект}} = 100$  мм;  $P_{\text{ср}} = 1,5$  Вт ( $\lambda = 0,51$  мкм);  $v_{\text{обр}} = 2$  мм/с;  $n = 2$ ;  $t_{\text{изг}} = 1,5$  ч



Режим обработки пластин :  $P_{изл} = 4$  Вт;  $F_{объект} = 150$  мм;  $v_{обр} = 4,5$  мм/с;  $n = 22$ ;  $d_{пятна} = 15$  мкм;  $\rho = 1,5 \cdot 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>  
 Габаритные размеры: 122,5x98,1 мм. Габаритный диаметр 163,5 мм.  
 Отверстия:  $\varnothing 0,5$ ; 2,0; 2,1; 2,8; 4,0 мм. Отверстия:  $\varnothing 1,52$  и щели 4,6x0,7;  
 и щели 2,0x11,2 мм;  $t_{изг} = 1$  ч (8,58...9,16)x1 мм;  $t_{изг} = 2$  ч

Рис. 9. Пластины для антенных систем из константана МН-45 и стали 8Ю ПН-В-1 толщиной 0,2 мм с соосностью отверстий и пазов  $\pm 5$  мкм, изготовленные на АЛТУ «Каравелла-2» и «Каравелла-2М»

После лазерной обработки



После ЭЭО



Рис.10. Фрагменты пластин из стали толщиной 0,2 мм

На АЛТУ «Каравелле-2М» изготавливаются прецизионные детали и больших размеров, например, пластины прямоугольной и круглой конфигураций с габаритными размерами 122,5x98,1 мм и 163,5 мм из константана МН-45 и стали 8ЮПВ-В-1 для антенных систем (рис. 9, 10) и трафареты размером 105x94 мм из бериллиевой бронзы (БрБ2) для заполнения отверстий межслойных соединений проводниковой пастой в производстве многослойных керамических плат.

Кроме высокого качества обработки, мини-

мального радиуса изгиба и выигрыша во времени по сравнению с ЭЭО, лазерная технология обеспечивает и высокую взаимную соосность отверстий и щелей (3...5 мкм).

При малых уровнях мощности весьма эффективной оказалась лазерная микрообработка по формированию топологий проводник-зазор с размерами 20...100 мкм на отечественном стеклокерамическом материале СКМ с толсто пленочным (10 мкм) серебряным или золотым покрытием для многослойных плат LTCC (рис. 11) [11].

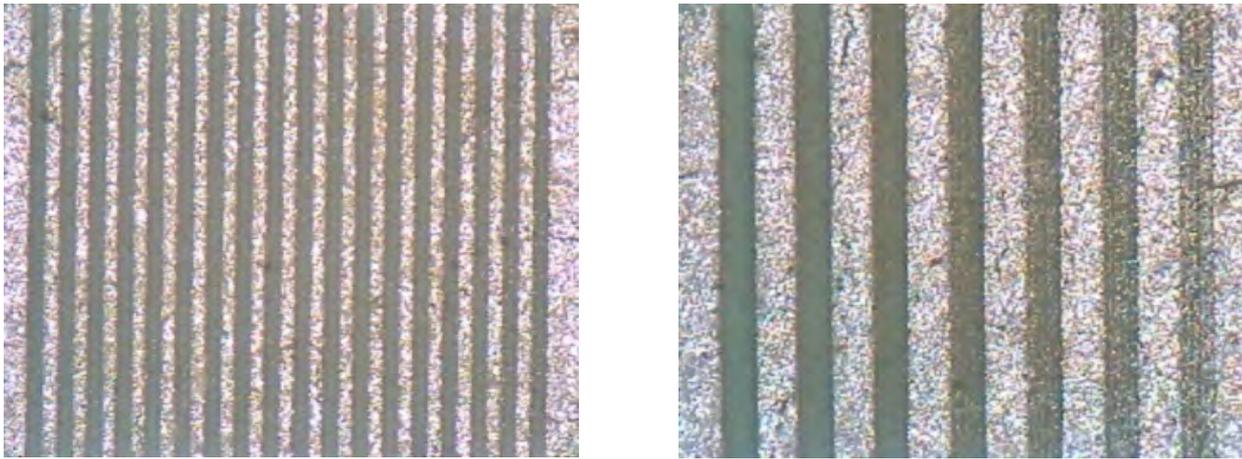


Рис. 11. Изображение фрагментов топологии проводник/зазор с размерами 40/40 и 100/100 мкм



Mo ≠ 0,6 мм; Ø 3,0 мм с перемычкой 0,2 мм



W ≠ 1 мм, Ø 7 мм и 2,2 мм с перемычкой 0,3 мм



Cu ≠ 1 мм, 4×4 мм



Cu ≠ 1 мм, Ø 250 мкм

Рис. 12. Фрагменты плоских деталей. Режим обработки:  $F_{\text{объект}} = 200$  и  $250$  мм;  $d_{\text{пятна}} = 20$  и  $25$  мкм;  $\rho = 5 \cdot 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>

Режим обработки с серебряным покрытием:  
 $P_{\text{изл}} = 0,3$  Вт;  $\lambda = 0,51$  мкм;  $F_{\text{объект}} = 100$  мм;  
 $v_{\text{обр.}} = 1$  мм/с;  $n = 3$ ;  $d_{\text{пятна}} = 10$  мкм;  
 $\rho = 2,5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

На рис. 14 показаны дополнительные технологические возможности АЛТУ «Каравелла» в производстве ИЭТ.

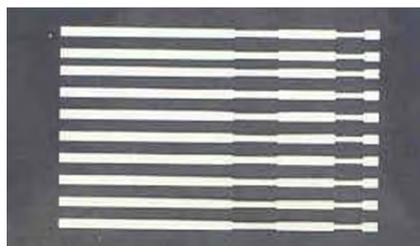
### Основные выводы

Показано, что наносекундным излучением ЛПМ с диаметром обрабатывающего светового пятна 10...20 мкм и плотностью пиковой

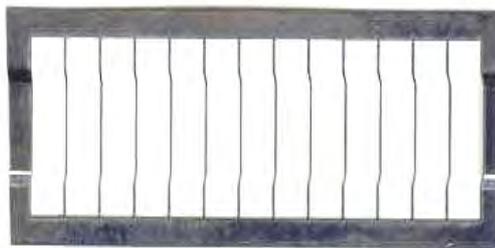
мощности  $10^{10} \dots 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> эффективно обрабатывать материалы толщиной не более 1 мм. И еще более эффективно применять ЛПМ при толщинах меньше 0,6 мм, когда время обработки составляет доли секунд, а скорость – единицы и десятки мм/с, что на порядок больше по сравнению с ЭЭО.

Исследовано качество поверхности лазерного реза и структура ЗТВ как для высокотеплопроводных, так и для тугоплавких материалов и установлено следующее:

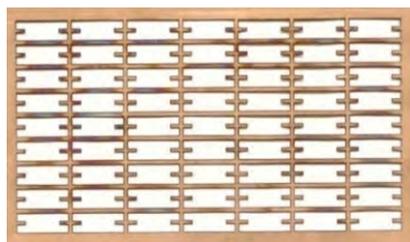
– поверхность лазерного реза имеет многоканальную структуру с периодом повторения



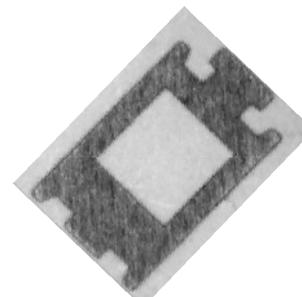
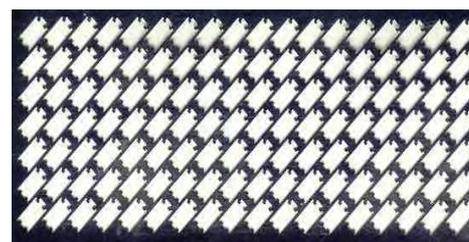
Ленты накаливания ионизатора из 30 мкм танталовой фольги для АЛТ на парах цезия



Аноды из молибдена толщиной 0,2 мм для электронных пушек ЦЗУ



Контакты из бериллиевой бронзы толщиной 0,1 мм



Развертки экрана из молибдена толщиной 0,15 мм для электронных пушек

**Рис. 13. Примеры изготовления массива деталей**

каналов 10–15 мкм и глубиной до 3...4 мкм;

– повышение скорости и числа проходов обработки приводит к уменьшению шероховатости поверхности реза до значений менее 1 мкм;

– в высокотеплопроводных металлах упрочнения или разупрочнения материала в прилегающей к лазерному резу зоне не происходит;

– в тугоплавких металлах с более низкой теплопроводностью, в прилегающей к лазерному резу зоне, происходит незначительное упрочнение.

Показано, что излучением ЛПМ эффективно обрабатываются как высокотеплопроводные (Cu, Al, Ag, Au), так и тугоплавкие (Mo, W, Ta, Re) и другие (Ni, Ti, Zr, Fe, Pb) металлы, их сплавы, большой круг полупроводников и диэлектриков (Si, Ge, GaAs, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

22ХС, сапфир, искусственный алмаза, стекло, кварц), графит и композиционные материалы толщиной 0,01...1,0 мм.

Большой объем изготовления прецизионных деталей на АЛТУ «Каравелла» показал ряд существенных преимуществ перед известными традиционными способами, включая и ЭЗО, особенно деталей сложных конфигураций:

– широкая номенклатура обрабатываемых конструкционных материалов, обработка без механического давления, эффективная обработка в атмосфере воздуха (без поддува технологического газа), экономия материалов при изготовлении и раскрое заготовки из листа, невысокая трудоемкость изготовления и универсальность технологической оснастки;

– более высокая производительность, уменьшение количества операций и перехо-

дов, высокая оперативность в обеспечение НИОКР;

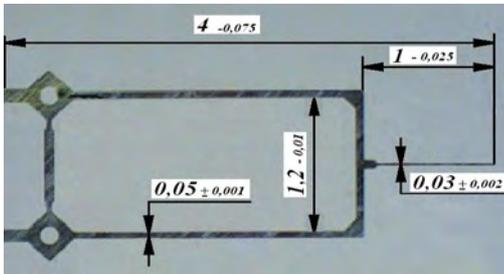
- малые шероховатость поверхности реза ( $\leq 1...2$  мкм) и зона термического влияния ( $\leq 5...10$  мкм), отсутствие расслоения и микротрещин металла в таких материалах, как молибден и вольфрам;

- наличие компьютерной базы данных на режимы лазерной микрообработки материалов, управление технологическими процессами от ПК, существенное снижение влияния человеческого фактора на воспроизводимость технологического процесса, высокий процент выхода годных деталей (до 100 %).

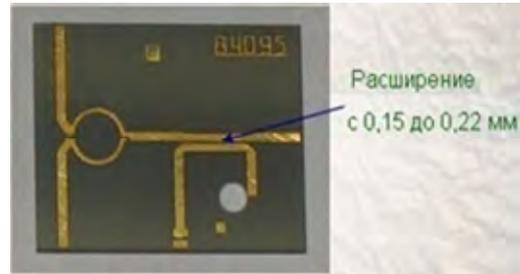
Установлено восемь перспективных технологических направлений по лазерной микрообработке материалов ИЭТ наносекундным излучением ЛПМ: контурная прецизионная резка, сверление микроотверстий методом

прямой прошивки, скрайбирование, раскрой припоев, обработка пленочных покрытий, поверхностная чистка деталей, формирование изображений в объеме прозрачных сред, маркировка и гравировка с высоким разрешением.

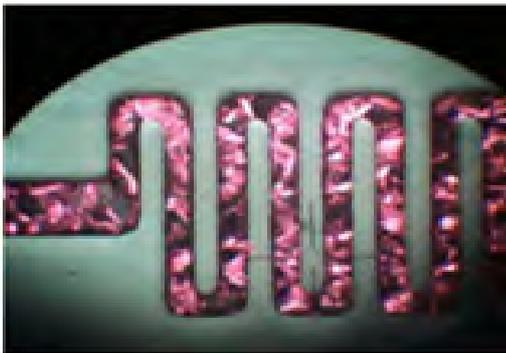
В настоящее время на технологическом оборудовании АЛТУ «Каравелла» в обеспечении НИОКР, единичного, мелкосерийного и серийного производств ИЭТ изготавливаются сотни типов плоских и объемных прецизионных металлических деталей простой и сложной конфигураций со скоростью обработки 0,5...5,0 мм/с толщиной 0,01...1,0 мм и производится оптимальный раскрой припоев (20...50 мкм) со скоростью до 15 мм/с. С максимальной производительностью (5...15 мм/с) вырезаются диски, окна и ЧИПы из искусственного поликристаллического алмаза, сапфира и кремния толщиной до 1,5...2 мм.



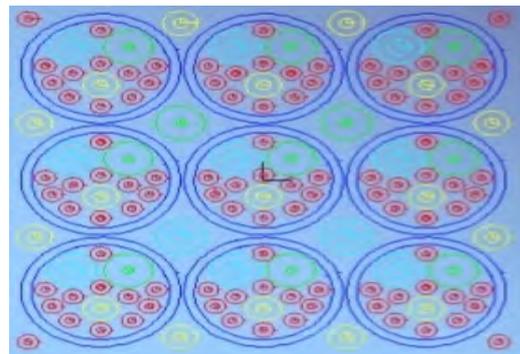
Катод из W-Re сплава с размерами 30 и 50 мкм



Корректировка топологии полосно-пропускных фильтров



Меандра с шагом 100 мкм из искусственного поликристаллического алмаза толщиной 0,2 мм



Раскрой припоя (20...150 мкм)



Раскрой сапфировых подложек толщиной 0,3...0,5 мм на ЧИПы в производстве МИС

Рис. 14. Дополнительные технологические возможности АЛТУ «Каравелла»

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 664 с.
2. Вакс, Е.Д., Миленский, М.Н., Сапрыки, Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Гехносфера, 2013. 708 с.
3. Григорьянц, А.Г., Казарян, М.А., Лябин, Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 312 с.
4. Григорьянц, А.Г., Казарян, М.А., Лябин, Н.А., Шиганов, И.Н. Сравнительный анализ параметров импульсного лазера на парах меди с известными типами технологических лазеров // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. № 1(67). С. ...
5. Вейко, В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2005. 110 с.
6. Вейко, В.П. Опорный конспект лекций «Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике». СПб: СПб ГУ ИТМО, 2012. 141 с.
7. Фигуровский, Д.К., Тронза, Е.И., Лябин, Н.А. Исследование структуры и свойств зоны термического воздействия (ЗВТ) после лазерной обработки тонколистовых тугоплавких и теплопроводных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. 2013. № 8(26). С. 26–30.
8. Лябин, Н.А. Исследование импульсного лазера на парах меди с промышленными активными элементами серии «Кулон» в режиме с одним выпуклым зеркалом и его возможности для технологических применений // Наука и образование. 2014. № 6. С. 1–15.
9. Лябин, Н.А., Григорьянц, А.Г., Казарян, М.А. Современные промышленные автоматизированные лазерные установки «Каравелла-1» и «Каравелла-1М» для прецизионной микрообработки материалов изделий электронной техники // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 9(40). С. 19–26.
10. Лябин, Н.А., Чурсин, А.Д., Парамонов, В.С. Современные промышленные автоматизированные лазерные технологические установки «Каравелла-2» и «Каравелла-2М» для прецизионной микрообработки тонколистовых материалов ИЭТ // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 10(40). С. 41–48.
11. Лябин, Н.А., Ляпин, Л.В., Семенюк, С.С. Применение технологии прецизионной лазерной микрообработки при макетировании и производстве многослойных керамических плат LTCC для изделий СВЧ-электроники //

Электронная техника. Сер. 1 СВЧ-техника. 2014. Вып. 3 (536). С. 211–220.

## REFERENCES

1. Grigoriyants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. *Technological Processes of Laser Processing: college manual*. M.: Publishing House of Bauman STU, 2006, pp. 664.
2. Vax, E.D., Milenky, M.N., Saprykin, L.G. *Practice in Precision Laser Processing*. M.: Technosphere, 2013. pp. 708.
3. Grigoriyants, A.G., Kazaryan, M.A., Lyabin, N.A. *Copper-Vapor Lasers: Structure, Characteristics and Application*. M.: PHUSMATHLIT, 2005. pp. 312.
4. Grigoriyants, A.G., Kazaryan, M.A., Lyabin, N.A., Shiganov, I.N. Comparative analysis of pulse copper-vapor laser parameters with well-known types of technological lasers // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2017. № 1(67). pp. ...
5. Veiko, V.P. *Basic Lecture Summary for the Course of "Physical-Engineering Fundamentals of Laser Technologies"*. Part: *Laser Micro-Processing*. S-Pb: S-Pb SU ITMO, 2005. pp. 110.
6. Veiko, V.P. Basic lecture summary "Laser Micro- and Nano-technologies in Micro-electronics". S-Pb: S-Pb SU ITMO, 2012. pp.141.
7. Figurovsky, D.K., Tronza, E.I., Lyabin, N.A. Study of structure and properties of thermal impact area (TIA) after laser processing of thin-sheet heat-proof and heat-conductive materials // *Science Intensive Technologies of Mechanical Engineering*. 2013. № 8(26). pp. 26–30.
8. Lyabin, N.A. Study of pulse copper-vapor laser with industrial active elements of "Coulomb" set in mode with one convex mirror and its potentialities for technological applications // *Science and Education*. 2014. № 6. pp. 1–15.
9. Lyabin, N.A., Grigoriyants, A.G., Kazaryan, M.A. Modern industrial automated laser plants of "Caravelle-1" and "Caravelle-1M" for precision micro-processing of materials for electronics products // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014. № 9(40). pp. 19–26.
10. Lyabin, N.A., Chursin, A.D., Paramonov, V.S. Modern industrial automated laser technological plants of for precision micro-processing of thin-sheet IET materials // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014. № 10(40). pp. 41–48.
11. Lyabin, N.A., Lyapin, L.V., Semenyuk, S.S. Application of precision laser micro-processing technology at prototyping and production of multilayer ceramic boards LTCC for products of microwave frequency electronics // *Electronics. Set 1 Microwave Engineering*. 2014. Ed. 3 (536). pp. 211–220.

Рецензент д.т.н. И.И. Артемов

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 16.12.2016. Выход в свет 28.02.2017.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+