

1562358

На правах рукописи

УДК 621.9.048.7

621.375.826

ЖАРИКОВ ВАЛЕРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

Исследование физических процессов взаимодействия излучения лазера на парах меди с материалами электронной техники и разработка технологий их прецизионной обработки

Специальность 05.03.07 - Оборудование и технологии лазерной обработки.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



г.Москва

1999г.

Работа выполнена в Государственном научно-производственном предприятии "ИСТОК".

Научный руководитель - кандидат технических наук Зубов В.В.

Научный консультант - доктор технических наук, профессор Григорьянц А.Г.

Официальные оппоненты

- доктор технических наук,
профессор Ямпольский В.М.
- кандидат технических наук,
доцент Веремеевич А.Н.

Ведущее предприятие - ЦЕНИ ИОФРАН

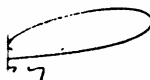
Защита диссертации состоится "10" 06 1999 г. на заседании диссертационного совета К.053.15.03 в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

ч экземпляре, заверенный печатью, просим

в библиотеке МГТУ.

_ 1999г.

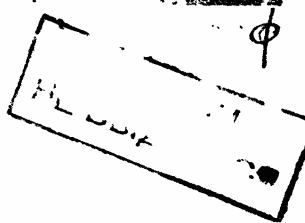
1562358



В.И.ГИРШ

Заказ № 102

Типография ГНПП "Исток"



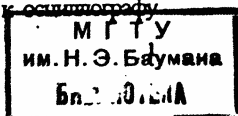
Общая характеристика работы.

Актуальность работы. Лазерные технологии, демонстрируя преимущества перед традиционными способами обработки материалов, с успехом внедряются в производство. Известны сотни примеров промышленного использования лазеров в автомобильной индустрии, часовом производстве и др. Но все таки, наметившийся мощный прорыв в технологии микрообработки с использованием излучения лазеров до сих пор находится в стадии ожидания. Это связано, преимущественно, с отсутствием надежного высокоэффективного лазера в коротковолновой области излучения. Развитие лазеров на парах меди (ЛПМ), связанное с решением задачи экономичного разделения изотопов химических элементов, позволяет надеяться на успешное применение этого излучения для прецизионной обработки различных тонколистовых материалов.

Развитие электроники требует привлечения новых материалов, например : композитных, пирографита, керметов, пленок с высокотемпературной сверхпроводимостью и многих других. Для их обработки стандартные технологии, как правило, не могут быть использованы, либо не приводят к положительному результату. Миниатюризация изделий требует локального дозированного воздействия с малыми побочными эффектами. Сложная пространственная конфигурация деталей разрабатываемых приборов требует наличия прецизионного инструмента с хорошим малоинерционным управлением и возможностью оперативной доставки в труднодоступные места. В ряде случаев требуется бесконтактная обработка, т.к. недопустимо привнесение даже минимальных количеств примесей в обрабатываемый материал (например, формовка катода). Все эти задачи под силу решить излучению лазера на парах меди.

Цель работы. Разработка технологии прецизионной обработки тонколистовых материалов электронной техники (медь, молибден, вольфрам, кремний и др.) излучением лазера на парах меди. Исследование особенностей взаимодействия излучения лазера на парах меди с материалом мишени. Выявление зависимости технологических характеристик процесса обработки от параметров режима воздействия излучения. Определение технологических возможностей обработки излучением лазера на парах меди.

Методика исследований. Все эксперименты проводились с использованием излучателя на парах меди типа "Карелия", построенного по схеме генератор-усилитель с пространственным фильтром-коллиматором. В качестве лазерных активных элементов (ЛАЗ) использованы серийно выпускаемые ГЛ-201. В качестве источника питания использовались либо двухканальный ламповый блок типа "Тлаз", либо два синхронизированных тиатронных блока ИП-18 типа "Криостат". Измерение мощности излучения производилось при помощи паспортизованного термоэлектрического измерителя ТИ-3, подключенного к микровольтметру М-95, с точностью не хуже 5%. Измерение скоростей сверления и резки осуществлялось с помощью секундомера. Длина реза определялась по отсчету индикатора текущих координат системы числового программируемого управления типа 15ИПЧ-001 с точностью до 1мм. Временные характеристики импульса излучения контролировались подключенным к осциллографу



фотоэлектронным устройством типа ФЭК-14 с блоком питания. Использовались также калиброванные стандартные оптические фильтры из комплекта к оптической скамье.

Научная новизна заключается в следующих положениях:

1. Эрозионный факел от воздействия на металлическую мишень (Mo, Cu) излучения ЛПМ с плотностью мощности в диапазоне $10^9 \dots 10^{11}$ Вт/см², практически (в пределах ошибки эксперимента в 2%), прозрачен для этого излучения.
2. Основным каналом диссипации энергии импульса излучения ЛПМ при воздействии на металлическую мишень с интенсивностью выше 10^9 Вт/см² является унос энергии паром. Доля этого канала может превышать 50%, а в пересчете на один удаленный атом составляет 10эВ .
3. Специфика многимпульсной многопроходной резки трудоемких деталей излучением лазера на парах меди с нестабильным резонатором позволяет компенсировать уход оси диаграммы направленности в пределах $\pm \Theta_{\text{дф}}$ при последующих проходах, ($\Theta_{\text{дф}}$ -дифракционная расходимость излучения ЛПМ).

Практическая ценность. Результаты работы были использованы при создании двух макетов автоматизированной лазерной технологической установки "Каравелла" на базе лазера на парах меди с излучателем типа "Карелия" и одного макета АЛТУ "Кинескоп" на базе лазера на парах меди типа "Кулон".

Процессы лазерной прецизионной резки и сверления тонколистовых материалов на опытном макете АЛТУ "Каравелла" используются в условиях экспериментального производства при изготовлении ответственных деталей из Mo, W, Cu, керметов и др., выпускаемых подразделениями ГНПП "Исток" и НПО "Платан" г.Фрязино.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- конкурсах молодых специалистов и технологов НПО "Исток" в 1982 и 1986 гг.
- II отраслевой научно-технической конференции "Источники питания и применения газовых лазеров" в октябре 1986 г., г.Рязань.
- IV national conference and technical exhibition with international participation "Laser and their applications", oktober 23-26, 1990, Plovdiv, Bulgaria.
- Отраслею научно-техническом семинаре "Лазерная техника и технология", 23-26 апреля 1991 г., г.Брянск.
- Симпозиуме "Лазеры на парах металлов и их применение", 22-25 сентября 1996 г., г.Новороссийск, Абрау-Дюрсо.
- VIII Международной конференции "Лазеры в науке, технике и медицине", 9-12 сентября 1997 г., г.Пушкинские горы.
- International conference on LASERS '98, december 7-11, 1998, Tucson, Arizona.

Основные результаты и положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах, в том числе двух авторских свидетельствах. Материалы работы составили также содержание соответствующих глав шести научно-технических отчетов по НИР и ОКР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе и изложена на 109 страницах. Представленная работа содержит 50 рисунков, 22 таблицы, 87 наименований использованных литературных источников.

Работа выполнена при содействии к.т.н. Иванова Ю.Н., которому автор выражает глубокую признательность. Автор благодарит Лябина Н.А. и Чурсина А.Д. за критическое обсуждение материалов исследований и помощь при проведении ряда экспериментов.

Содержание работы

Глава 1 содержит анализ традиционных способов размерной обработки тонколистовых материалов. Отмечается, что для изготовления мелких и средних партий деталей наиболее конкурентоспособными являются методы электроискровой и лазерной обработки. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Электроискровая обработка имеет возможность изготовления пакета деталей, лучшую по качеству внутреннюю поверхность отверстия и реза, но малую скорость процесса и значительную дефектную зону, а также сравнительно большой подготовительный период. Лазерная обработка обладает большой скоростью процесса, оперативностью, универсальностью, малым размером отверстия и реза, но имеет недостатки в виде их не идеальной формы и значительной шероховатости поверхности.

Сравнение технических характеристик различных типов лазеров, с точки зрения применения их для микрообработки, позволяет отдать предпочтение импульсным источникам излучения, работающим в коротковолновой области спектра. Проведенный анализ рекламной информации и литературных источников позволил также установить, что по технико-экономическим параметрам лазер на парах меди имеет преимущество перед другими типами лазеров, используемых для прецизионной обработки.

Глава 2 посвящена изучению параметров импульса излучения лазера на парах меди при различных режимах его работы. Отмечена перспективность применения неустойчивого конфокального резонатора перед однозеркальным, с точки зрения обеспечения большей концентрации энергии в зоне обработки. Анализ развития импульса излучения позволяет выделить главную особенность лазера на парах меди при воздействии на материал мишени. Она состоит в непрерывном уменьшении расходимости излучения на протяжении всей длительности импульса. Для лазера, построенного по схеме генератор-усилитель с пространственным фильтром-коллиматором, этот эффект несколько уменьшается, но, все равно, имеет преобладающее значение. Тип и параметры резонатора определяют скорость изменения расходимости и, в конечном итоге, влияют на структуру и состав излучения. Изменение электрических параметров возбуждения активной среды приводит к изменению структуры и состава излучения (см.рис.1).

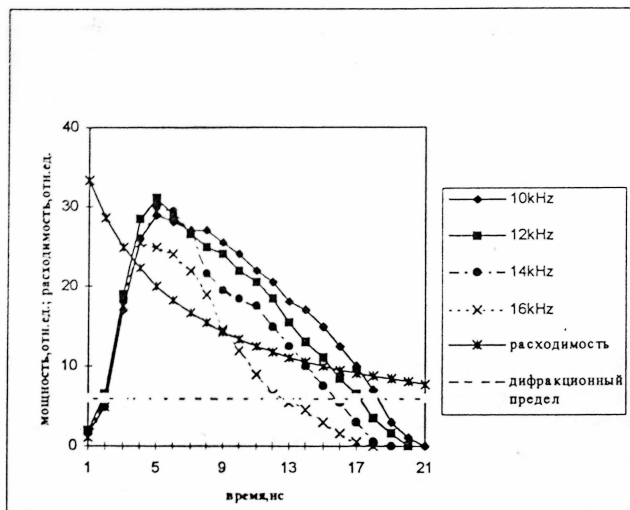


Рис.1. Форма импульса для различных частот следования и качественная картина изменения расходимости излучения.

Экспериментально исследовано распределение интенсивности в пятне фокусировки для различных типов резонатора. Для импульса излучения с энергией в 2 мДж, интенсивность в центре пятна соответствует значению $9,2 \cdot 10^{10} \text{ Вт/см}^2$. "Крылья" распределения соответствуют начальной стадии развития импульса (рис.2).

Экспериментально исследована поляризация излучения ЛПМ, построенного по схеме генератор-усилитель на основе промышленных ЛАЭ ГЛ-201. Поляризация, усредненная по большому числу импульсов излучения (случай, соответствующий стандартному режиму многоимпульсной обработки), отсутствует.

С точки зрения воздействия излучения на материалы, импульс ЛПМ удобно представить в виде суперпозиции двух пучков с различной расходимостью, разнесенных по времени на постоянную резонатора $2L/c$, где L - длина резонатора, c - скорость света. Каждый пучок в пятне фокусировки имеет свой коэффициент сосредоточенности - $k_{1,2}$. Суммарное воздействие пучков в фокальной плоскости можно выразить следующим условием:

$$q = \begin{cases} 0; & \text{при } t < 0; \\ q_{01}\xi_{11}(t)\exp(-k_1 r^2); & \text{при } 0 < t < 2L/c; \\ q_{01}\xi_{11}(t)\exp(-k_1 r^2) + q_{02}\xi_{22}(t)\exp(-k_2 r^2); & \text{при } 2L/c < t < 3L/c; \\ q_{02}\xi_{22}(t)\exp(-k_2 r^2); & \text{при } 3L/c < t < t_{\text{max}}; \\ 0; & \text{при } t > t_{\text{max}} \end{cases} \quad (1)$$

где Q_n - амплитуда n -го пучка, $\xi_n(t)$ - функция развития пучка, зависящая только от времени, $\tau_{\text{имп}}$ - длительность импульса генерации, r - расстояние от центра пятна.

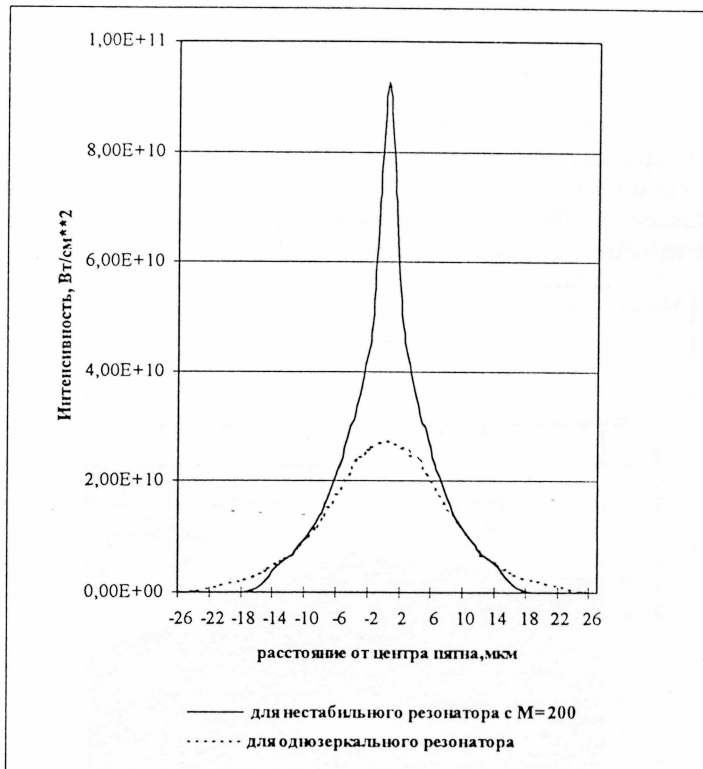


Рис.2.2. Распределение интенсивности излучения ЛПМ в пятне фокусировки.

Таким образом, прогрев материала начинается с малой интенсивности на большей площади, сжимаясь в процессе импульса излучения в малую область с постоянным нелинейным нарастанием плотности мощности, что позволяет избежать огромного градиента температуры, термического удара и формирования ударной волны. Применение диафрагмы соответствующих размеров, установленной в фокальной плоскости, позволяет выделить финишную часть импульса излучения заданной длительности. Профиль лунки от одного импульса излучения воспроизводит распределение интенсивности в пятне фокусировки с точностью до масштабного коэффициента.

Глава 3 посвящена исследованию взаимодействия излучения лазера на парах меди с материалом мишени. Отдельными задачами изучения взаимодействия являлись :

- взаимодействие излучения с поверхностью;
- разрушение материала и образование лазерного эрозийного факела (ЛЭФ);
- взаимодействие лазерного излучения с ЛЭФ;
- воздействие ЛЭФ на поверхность;

Экспериментально установлена зависимость отражения излучения лазера на парах меди для ряда металлов (Cu, Mo и др.) от плотности мощности. Отмечено повышение отражательной способности при интенсивности излучения, немногим меньшего порога разрушения материала, связанной с очисткой поверхности

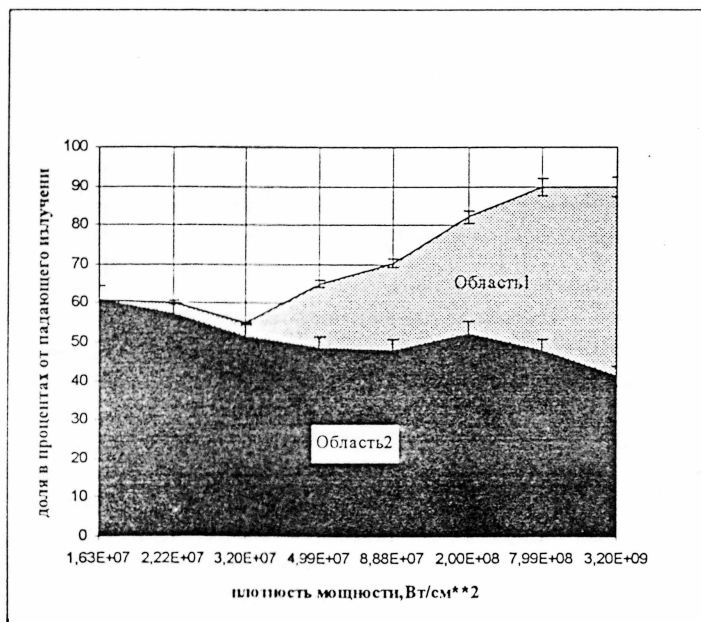


Рис.3.1. Зависимость долей поглощаемой (темная область) и уносимой продуктами разрушения (светлая область) энергии от плотности мощности.

металла от окисла и загрязнений. В целом, повышение плотности мощности приводит к уменьшению коэффициента отражения до 0,09.

Независимые эксперименты по исследованию энергии, уносимой парами и частицами обрабатываемого материала, показали, что, начиная со значения плотности мощности $3,2 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ доля этой энергии монотонно возрастает с увеличением

плотности действующей мощности. При интенсивности более $3,2 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$ этот канал диссипации энергии лазерного импульса становится основным. В пересчете на один удаленный атом уносимая энергия превышает 10 эВ .

Проведенные эксперименты по исследованию поглощения излучения ЛПМ эрозионным факелом от воздействия аналогичного излучения показали, что в диапазоне задержки зондирующего импульса от 0 до 45 нс поглощения излучения продуктами разрушения металлической мишени не происходит (в пределах суммарной ошибки измерительного прибора и условий измерения в 2%).

Проведя анализ возможных каналов диссипации энергии импульса излучения лазера на парах меди при взаимодействии его с металлической мишенью, можно составить диаграмму баланса (рис.4). Таким образом, можно утверждать, что основная часть энергии импульса излучения, падающего на мишень, уносится продуктами разрушения.

Сравнение полученных результатов с более поздними данными других исследователей подтверждает, в целом, их правильность.



Рис.4. Баланс энергии импульса излучения ЛПМ.

Глава 4 посвящена исследованию технологических параметров обработки материалов электронной техники излучением ЛПМ.

Обработка излучением ЛПМ является частным случаем лазерной технологии. В то же время, специфические свойства ЛПМ излучения иногда накладывают свой отпечаток на процессы лазерного сверления и резки, отличный от других типов лазеров. Высокая концентрация энергии в пятне фокусировки позволяет обрабатывать, практически, любой материал. Малая энергия импульса излучения сводит к минимуму дефектную зону вокруг отверстия и является залогом качественной обработки. Высокая частота следования импульсов обеспечивает хорошую производительность. Малая длина волн генерации и

близкая к дифракционной расходимость определяют возможности применения в микрообработке.

Основными факторами, влияющими на параметры обработки излучением ЛПМ, являются

- толщина материала;
- плотность мощности в пятне фокусировки;
- частота следования импульсов;
- наличие вспомогательного технологического газа;

Из-за малой величины энергии импульса влияние *толщины материала* наиболее весомо и однозначно. Линейное снижение производительности при росте толщины связано с диафрагмированием луча на формирующемся отверстии, что подтверждается схожим видом зависимости доли прошедшей через отверстие мощности от толщины. Экспериментальная зависимость углубления отверстия за один импульс от числа предшествующих импульсов сверления приведена на рис.5.

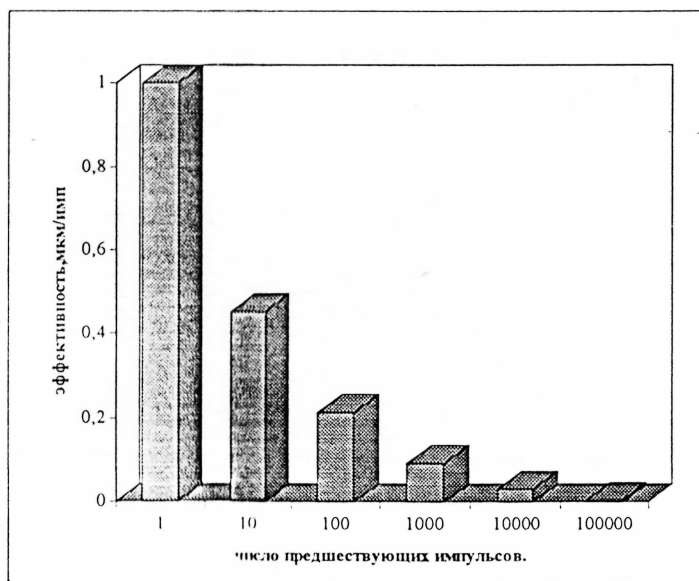


Рис.4.2. Зависимость эффективности удаления материала отдельным импульсом от числа предшествующих.

Влияние средней мощности на производительность обработки очевидно. Зависимость от нее других параметров несколько сложнее. В таблице 1 приведена зависимость диаметров отверстий от *средней мощности* излучения для различных времен экспозиции. Изменение мощности излучения производилось, в первом случае -

ограничением лазерного луча ирисовой диафрагмой, а во втором - управлением электрической мощностью, вводимой в лазерные активные элементы. Уменьшение мощности излучения приводит к уменьшению размера входной "распушки" из-за равномерного уменьшения распределения интенсивности излучения в пятне фокусировки. Размеры как входного, так и выходного диаметров отверстия монотонно возрастают с ростом времени экспозиции. Для больших значений средней мощности (согласно таблице) можно говорить о стабилизации входного размера в течение нескольких секунд.

Влияние способа уменьшения средней мощности излучения сильнее проявляется на размере входного отверстия. Диафрагмирование луча, кроме уменьшения средней мощности, приводит к дифракции излучения на отверстии и искажению распределения интенсивности в фокальной плоскости (росту т.н., "крыльев"). При уменьшении размера диафрагмы эффект усиливается. Отсутствие зависимости размера диаметра на выходе отверстия от способа варьирования средней мощностью подтверждает описанный в предыдущей главе механизм двухпучкового воздействия излучения ЛПМ. Благодаря избыточной плотности мощности в дифракционном пучке, значительное уменьшение средней мощности (более чем в 2 раза) не приводит к изменению размера выходного отверстия.

Таблица 1.

Влияние мощности излучения и времени сверления на диаметр отверстия.

	Размер $\Rightarrow$ диафрагмы, мм	20	16	13	9,5				
	Время $\Downarrow$ сверления, с	22Вт	15Вт	9,5Вт	5Вт	22Вт	16,5Вт	11Вт	2,2Вт
Входной диаметр, мм	1с.	100	80	50	40	100	85	40	25
	3с.	105	90	70	45	105	100	55	30
	10с.	110	110	80	50	110	100	75	35
Выходной диаметр, мм	1с.	25	25	25	17	25	25	25	10
	3с.	40	30	30	20	40	35	30	14
	10с.	55	40	35	25	55	40	35	17

Зависимость технологических параметров обработки излучением ЛПМ для ряда материалов от характеристик резонатора приводится в таблицах 2 и 3. Изменение соотношений между первым и вторым качественными пучками в распределении интенсивности излучения в пятне фокусировки по разному влияет на параметры отверстий в материалах с различными теплофизическими характеристиками. Следует заметить, что такое поведение легко объяснимо предложенной ранее моделью импульса излучения. Если для алюминия первый качественный пучок подплавляет значительную площадь поверхности, а второй пучок производит удаление материала на площади, немного превышающей площадь пятна, ограниченного значением интенсивности $3 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$, то улучшение качества второго пучка (при замене резонатора с $M=30$ на резонатор с $M=60$)

приводит к уменьшению поперечных размеров отверстия. Для меди картина несколько меняется. Из-за малой разницы в критических плотностях мощности для плавления и испарения меди, уменьшение расходимости первого качественного

Таблица 2.

Влияние параметров резонатора на производительность
обработки излучением ЛПМ.

Тип резонатора, мощность	Площадь-R120, 145Вт		M30, 17Вт		M60, 18Вт		M30, 20Вт	
Материал, толщина, мм	время сверле- ния, с	макс. скорость резания, мм/с	время сверле- ния, с	макс. скорость резания, мм/с	время сверле- ния, с	макс. скорость резания, мм/с	время сверле- ния, с	макс. скорость резания, мм/с
Св. 1.0	2.8	0.018	2.9	0.02	1.5	0.043	1.4	0.064
Mo, 1.0	-	-	6.2	0.016	1.6	0.043	1.2	0.080
Mo, 0.5	-	-	0.5	0.9	-	-	-	-
Mo, 0.3	-	-	0.1	3.2	-	-	-	-
Al, 0.6	-	-	-	-	0.4	2.27	0.2	3.06
Ta, 0.8	-	-	0.8	-	-	-	-	-

пучка при замене резонатора начинает играть определяющую роль. В результате, критическая плотность мощности в $7 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ достигается на большей площади.

Таблица 3.

Сравнение параметров отверстий для различных материалов.

Материал	алюминий		медь		
Параметры резонатора	M30	M60	M30	M60	Пл-120
Входной диаметр, мм	63	56	40	84	25
Выходной диаметр, мм	38	32	22	25	14

Одной из особенностей ЛПМ, построенного по схеме генератор-усилитель, является сложная зависимость параметров выходного излучения от рассинхронизации запусков ЛАЭ. Одна из них приведена на рис.6. Изменение средней мощности излучения является не единственным следствием рассинхронизации. Основные изменения выходного импульса излучения связаны с изменением качественного состава. При опережающем подключении "усилителя" относительно оптимального времени запуска, преимущественному усилению подвергаются пучки с большей расходимостью, расположенные на переднем фронте импульса "генератора". При запаздывающем запуске усиливаются пучки с близкой к дифракционной расходимостью. Это приводит к

различному характеру теплофизического воздействия на материал при рассинхронизации и выражается в изменении эффективности и качества обработки.

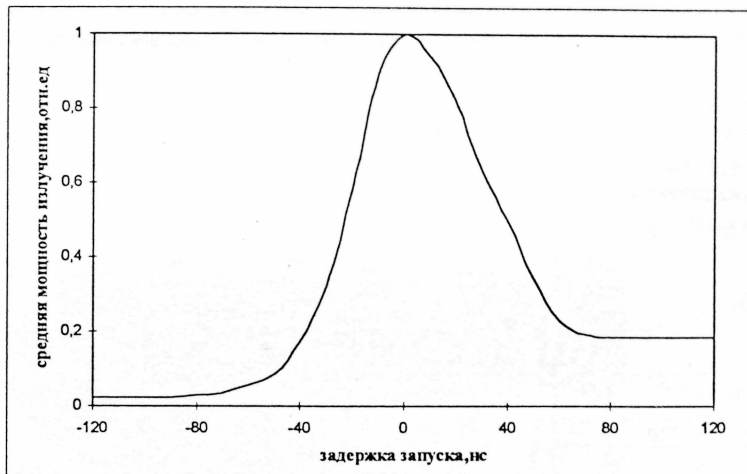


Рис.6. Зависимость средней мощности от синхронизации.

На рис.7 приводится зависимость удельной скорости сверления (скорость сверления приведенная к 1Вт средней мощности излучения) от величины рассинхронизации. Четко выражены два максимума, соответствующие оптимальным настройкам на два

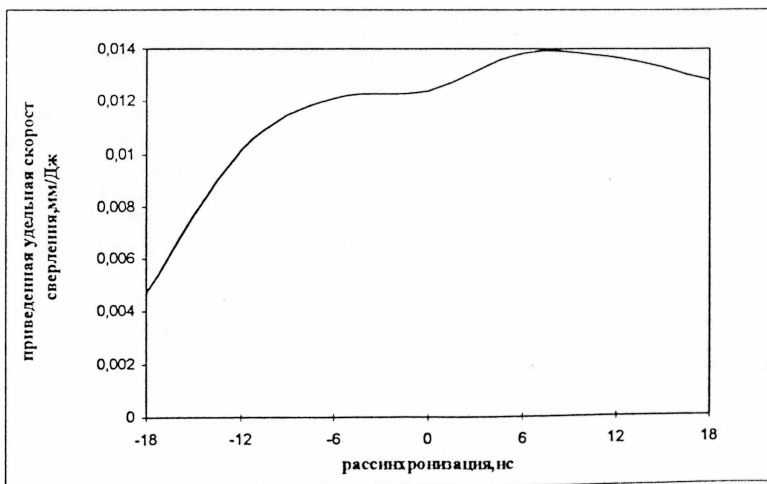


Рис.7. Влияние рассинхронизации на удельную скорость сверления медного образца толщиной 0,94мм.

основных пучка импульса излучения. Относительная эффективность обработки одним качественным пучком высока, но, при учете уменьшения средней мощности излучения, менее целесообразна, чем в случае оптимальной синхронизации. Еще одной особенностью является т.н. "канализация" излучения при резке ЛПМ. Эффект выражается в увлечении качественного пучка в сформированный предыдущими импульсами канал посредством переотражения стенкой воронки от менее качественного пучка. Формирование нового канала начинается после смещения всего дифракционного пучка за контуры канала. Эффект подтверждается рис.8 и может являться стабилизатором ухода оси диаграммы направленности при многопроходной обработке. Этот эффект определяет также минимально возможный

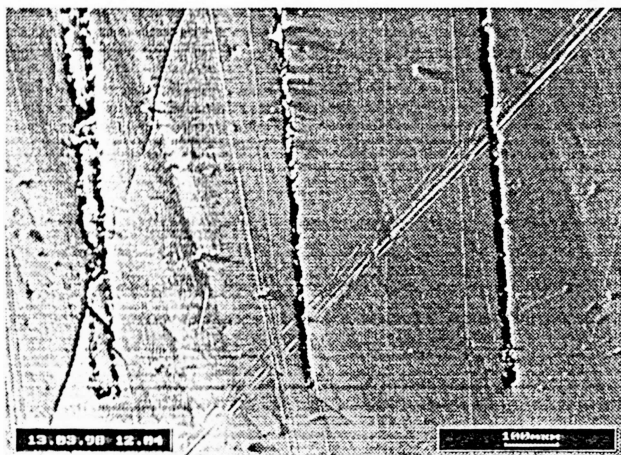


Рис.8. Зависимость точности резки от смещения положения луча в перпендикулярной направлению движения плоскости (отсчет справа налево : 1рез- двойной проход без смещения; 2рез- смещение 20мкм; 3рез- смещение 40мкм). Нестабильный резонатор M=200. Ахроматический объектив с F=100мм.

элемент обработки и предельную шероховатость стенки реза. В данной главе подробно рассмотрены также:

- влияние различных технических характеристик процесса обработки на соотношение пар/жидкость в продуктах разрушения;
- влияние поддува технологического газа на качество и производительность обработки;
- влияние чистоты следования импульсов на технические параметры резки и сверления;
- формообразование отверстия и реза;

- влияние спектрального состава излучения на характеристики обработки;
- факторы, влияющие на точность и воспроизводимость изготовления деталей излучением ЛПМ.

Изучены условия, позволяющие для каждой конкретной детали подобрать компромиссный режим обработки, учитывающий характер материала, необходимую производительность, размер допустимой дефектной зоны, качество кромки и чистоту реза, высоту и объем выплеска жидкой фазы.

Глава 5 посвящена применению излучения ЛПМ. Описываются макеты трех автоматизированных лазерных технологических установок "Каравелла", "Каравелла-К" и "Кинескоп", при создании которых были использованы материалы данных исследований. В таблице 4 приводятся технические характеристики АЛТУ "Каравелла".

Таблица 4.

Технические характеристики АЛТУ "Каравелла"

Параметры	Значение
Длина волны излучения, мкм	0,51 и 0,58
Средняя мощность излучения, Вт	20
Длительность импульса излучения, нс	20
Частота следования импульсов, кГц	10
Расходимость, мрад	0,1-0,5
Поляризация	отсутствует
Плотность мощности в зоне обработки, Вт/см ²	$5 \cdot 10^9$
Нестабильность средней мощности излучения за 1 час, %	2,5
Нестабильность энергии импульсов, %	3,5
Нестабильность оси диаграммы направленности, мкрад/час	1,0
Фокусное расстояние объектива, мм	100
Рабочий ход каретки стола, мм X Y	140 110
Диапазон скоростей перемещения каретки стола, мм/с	0,05-6,0
Ошибка позиционирования, мкм	10
Увеличение системы наблюдения, крат	25
Время готовности к работе, мин.	45
Потребляемая мощность, кВт	10
Расход воды для охлаждения, л/мин.	10
Габаритные размеры (без ПУ и СЧПУ), мм	2320*880*1950
Масса, кг	< 1000

Описываются технические решения, основанные на специфике ЛПМ : быстродействующий безинерционный электронный затвор и система наблюдения в реальном масштабе времени типа "лазерный проекционный микроскоп". Рассмотрены особенности эксплуатации АЛТУ на базе ЛПМ. Приводятся многочисленные примеры деталей изделий электронной техники, выполненных с использованием излучения лазера

на парах меди. Проанализированы основные направления технологического применения ЛПМ.

Выводы и результаты работы.

1. Из технологических лазеров, пригодных для обработки основных материалов электронной техники, характеристики лазера на парах меди наиболее полно отвечают требованиям прецизионной обработки: малая длина волн генерации, малая энергия импульса при высокой (до 10^{11} Вт/см²) плотности мощности, короткий импульс при большой скажности (~5000), близкая к дифракционной расходимость и др.

2. В сферу лазерной прецизионной обработки вовлечены материалы с высокой теплопроводностью (медь, алюминий, серебро и др.), тугоплавкие (молибден, вольфрам, тантал и др.) и ряд полупроводников (кремний, германий и др.).

3. При экспериментальном исследовании взаимодействия излучения ЛПМ с материалом мишени обнаружено следующее:

- начиная с $5 \cdot 10^7$ Вт/см², повышение плотности мощности приводит к резкому уменьшению отражения от металлической поверхности;
- эрозионный факел от воздействия на металлическую мишень (Mo, Cu) излучения ЛПМ с плотностью мощности в диапазоне $10^9 \dots 10^{11}$ Вт/см² (в пределах ошибки эксперимента в 2%) прозрачен для этого излучения;
- основным каналом диссипации энергии импульса излучения ЛПМ при воздействии на металлическую мишень с интенсивностью выше 10^9 Вт/см² является унос энергии паром. Доля этого канала может превышать 50%. Энергия, уносимая продуктами разрушения, в пересчете на один удаленный атом составляет 10эВ;

4. Особенностью обработки излучением ЛПМ является преобладающее влияние на параметры резки и сверления соотношения энергии в пучках. Это соотношение определяется типом и параметрами резонатора, величиной синхронизации запуска активных элементов, параметрами разрядной цепи, частотой следования импульсов.

5. Поддув защитного газа (гелия) в зону обработки приводит к повышению чистоты поверхности, уменьшению объема жидкой фазы и росту производительности: сверления в 4, а резки в 1,5 раза.

6. Селекция зеленой линии генерации позволяет уменьшить размер отверстия, в среднем, в 1,4 раза.

7. Размер дифракционного пучка, в конечном итоге, определяет:

- величину погрешности обработки по контуру (точность) при многопроходной резке;
- предельную шероховатость поверхности реза;
- размер минимального элемента обработки.

8. Высокая скорость охлаждения металлов ($\sim 10^{10}$ °К/с) и значительный градиент температуры ($10^9 \dots 10^{10}$ °К/м) после локального воздействия импульса излучения лазера на парах меди приводит к модификации приповерхностного слоя. Свойства такого слоя, в

ряде случаев, являются уникальными, например, в 2...4 раза возрастает электрическая прочность электродов.

9.Примененная методика исследования позволила установить, что

- расходимость излучения лазера на парах меди с нестабильным резонатором монотонно убывает на протяжении длительности импульса;
- поверхностный тепловой источник, эквивалентный по энерговыведению действию сфокусированного импульса лазера на парах меди, представляет быстро стягивающуюся область с непрерывным нарастанием плотности теплового потока;
- в математической модели теплового источника достаточно учитывать два осесимметричных пучка с различными коэффициентами сосредоточенности и разнесенными по времени на характеристическую постоянную резонатора;

10.Разработка, изготовление и длительная эксплуатация (более 10лет) опытного образца АЛПУ "Каравелла" продемонстрировали возможность создания высокотехнологичного оборудования на базе лазеров на парах меди.

11.Образцы деталей из меди, молибдена, кремния, графита, кермета и др., изготовленные для конкретных приборов СВЧ электроники, подтвердили высокое качество обработки излучением лазера на парах меди.

12.Относительно традиционных методов обработки (электроискровой, штамповки и др.), использование макета АЛПУ "Каравелла" позволяет сократить в 3...8 раз время изготовления малых партий деталей (включая подготовительный период).

13.Применение усовершенствованной системы наблюдения на базе лазерного проекционного микроскопа позволило полнее использовать возможности лазеров на парах меди в технологических установках на их основе.

14.Использование изменения оптических свойств активной среды усилителя в процессе генерации позволило осуществить модуляцию мощности излучения лазера на парах меди. Это расширило технологические возможности установки, т.к. оперативное управление мощности при помощи стандартных методов, из-за специфики излучения ЛПМ, проблематично.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Разработка лазерного активного элемента на парах меди для технологических установок импульсного локального отжига поверхностей пластин интегральных схем изделий микроэлектроники: Отчет по ОКР / НПО "ИСТОК"; Руководитель В.В.Зубов. - № ГР Ф13794/0003236; Инв. № 67-6466. - Фрязино, 1982. - 68 с.
2. Газовая тепловая линза в лазере на парах меди / В.М.Жариков, В.В.Зубов, М.А.Лесной и др. // Квантовая электроника. - 1984. - Т. 11, № 5 (11). - С. 918-923.
3. Разработка излучателя лазера на парах меди со средней мощностью 20Вт, частотой следования импульсов 8...12 кГц, минимальной наработкой

- активных элементов 500 часов для лазерного технологического оборудования: Отчет по ОКР / НПО "ИСТОК"; Руковод. В.В.Зубов. - № ГР Ф20415/3003069; Инв. № 223-7728 - Фрязино, 1986. - 36 с.
4. Создание экспериментальной технологической установки на базе импульсного лазера на парах меди с выходной мощностью 20 Вт для прецизионной обработки материалов, используемых в производстве ИЭТ: Отчет о НИР / НПО "ИСТОК"; Руководитель В.П.Беляев; - № ГР У25273/5004793; Инв. № 99-7890. - Фрязино, 1987. - 73 с.
 5. Применение ЛПМ для прецизионной размерной обработки металлов и полупроводниковых материалов ИЭТ / В.С.Алейников, В.П.Беляев, В.М.Жариков и др. // Электронная техника: Тез. докл. конференций / ЦНИИЭ. - М., 1986. - С. 21-22. - (Серия 11. Лазерная техника и оптоэлектроника; Вып.5(239)).
 6. Destruction of opaque solid materials using radiation of copper vapour laser for their dimensional treatment / V.S.Aleynikov, V.P.Belyaev, V.M.Zharikov and an. // Laser and their applications: IV National Conference and Technical Exhibition with International Participation. - Plovdiv (Bulgaria), 1990. - P. 190.
 7. Automated Cu-vapour laser-based setup for dimensional treatment of low thickness materials / V.M.Zharikov, V.V.Zubov, Y.N.Ivanov and an. // Laser and their applications: IV National Conference and Technical Exhibition with International Participation. - Plovdiv (Bulgaria), 1990. - P. 188.
 8. Использование эффектов разрушения непрозрачных твердых материалов излучением ЛПМ с целью их размерной обработки / В.С.Алейников, В.П.Беляев, В.М.Жариков и др. // Лазерная техника и технология: Сб.тезисов докладов отраслевого научно-технического семинара. - Брянск, 1991. - С. 28.
 9. Жариков В.М., Зубов В.В., Иванов Ю.Н. Макет автоматизированной установки на базе лазера на парах меди и его технологические возможности в области размерной обработки материалов малых толщин // Лазерная техника и технология: Сб.тезисов докладов отраслевого научно-технического семинара. - Брянск, 1991. - С. 66.
 10. Жариков В.М., Зубов В.В. Получение пленки α -Si при помощи лазерного излучения // Письма в Журнал технической физики. - 1992. - том 18, вып.7. - С. 67-68.
 11. Особенности обработки пиролитического графита / Н.В.Коньков, Р.В.Грицук, Г.А.Парилова и др. // Электронная техника: Науч.-техн. сб. / ЦНИИЭ. - М., 1993. - С. 29-33. - (Сер. "СВЧ-техника"; Вып. 4 (458)).
 12. Feinstschneiden mit Nd:YAG - und Cu-Lasern / K.Dickmann, E.Dik, V.M.Zharikov и др. // Laser und Optoelektronik. - 1996. - №28 (1). - S. 52-57.
 13. Application of copper vapour lasers in the production of electronic parts / V.M.Zharikov, V.V.Zubov, Yu.N.Ivanov and an. // J.Moscow Phys.Soc. - 1997. - № 7. - P. 339-350.