

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ В КРЕМНИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ 3D СТРУКТУР

Цель работы

Ознакомление с 3D структурами, изучение физико-кинетической модели и процесса формирования отверстий в неметаллических материалах с помощью лазерного излучения, применяемого оборудования и исследование структуры материала в зоне воздействия лазерного излучения.

1. Теоретические сведения

Полупроводниковая промышленность заинтересована в создании устройств малых размеров с высокой степенью интеграции, широким набором функций и доступных по стоимости. Эффективное решение этой задачи возможно с использованием систем в корпусе (СвК). За последние 10 лет было произведено более 1 млрд таких устройств, из них 40% - в виде трехмерных (3D) сборок. 3D-модуль (далее - 3DM) представляет собой систему, состоящую из двух или более микросхем, расположенных вертикально в стек на одной подложке, каждая из которых предназначена для выполнения своей функции. Конструкция 3DM (рисунок 3.1) обеспечивает электрические межсоединения микросхем, содержащихся в модуле, с наружными выводами, теплоотвод (активное, пассивное охлаждение) и защиту от окружающей среды. Сегодня этот подход к созданию микросхем является одним из основных.

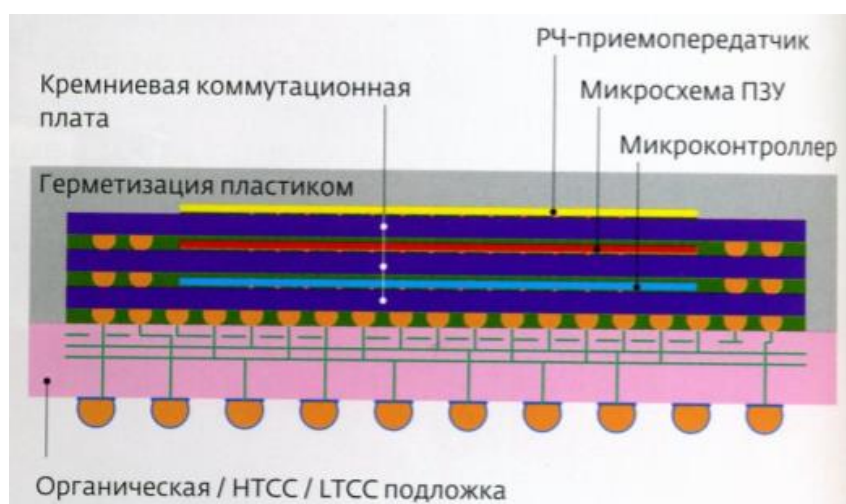


Рисунок 3.1 – Конструкция 3DM на основе кремниевой коммутационной платы

Основное преимущество СвК заключается в способности интегрировать множество микросхем на основе различных технологий в единый корпус. В результате удастся получить гетеросистему высокой производительности. Одно из современных направлений реализации СвК технология 3D TSV (Through Silicon Vias - сквозные отверстия в кремнии). Создать отверстий необходимого диаметра с соответствующим технологическим требованиям уровнем качества традиционным сверлением в данный момент крайне трудно, а порой и невозможно.

Лазерная обработка отверстий – один из перспективных методов создания таких отверстий. При воздействии лазерного излучения в виде отдельного импульса образование отверстия происходит за счет плавления и испарения материала.

Большое значение в формировании отверстий при обработке плавящихся материалов единичным импульсом имеет перераспределение жидкой фазы до момента затвердевания. В результате этого форма отверстия может значительно отличаться от той, которая в момент окончания импульса определялась геометрией луча, кинетикой испарения и гидродинамикой выброса части материала в жидкой фазе.

Образование большого объема жидкой фазы и ее неполное удаление из отверстия являются, как правило, неблагоприятными и трудноуправляемыми факторами, существенно снижающими эффективность и точность сверления единичным импульсом лазерного излучения.

С этой точки зрения высокое качество отверстий обеспечивается при сверлении испаряющихся (сублимирующихся, возгоняющихся) неметаллов, при разрушении которых под действием лазерного излучения жидкая фаза практически отсутствует. Основным методом повышения точности и качества лазерной размерной обработки является многоимпульсная обработка материалов (МИО).

Сущность МИО заключается в том, что отверстия формируются за серию импульсов излучения лазера определенной энергии и длительности, последовательно доводящих размеры отверстий до необходимых.

Основными процессами, приводящими к образованию отверстий в материалах с использованием лазерного излучения, являются испарения и плавления вещества. По глубине отверстие растет за счет испарения, а по диаметру - за счет плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением паров. При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью материала часть излучения поглощается и рассеивается продуктами разрушения.

Лазерная обработка применяется главным образом для получения отверстий диаметром ($d_{\text{отв}}$) до 0,5 мм и глубиной (h) до 5 мм. Применение многоимпульсной обработки (МИО) позволяет расширить технологические возможности лазерной прошивки и получить отверстия с соотношением $h/d_{\text{отв}}$ до 50. Кроме того, правильный выбор режимов обработки позволяет перейти от получения черновых отверстий к получению чистовых, точность размеров и формы которых достигают 7-го качества.

При сверлении, как и при резании, свойства обрабатываемого материала существенно влияют на параметры лазера, необходимые для выполнения операции. Сверление осуществляют импульсными лазерами, работающими как в режиме свободной генерации с длительностью импульсов порядка 1 мкс, так и в режиме с модулированной добротностью с длительностью в несколько десятков наносекунд. В обоих случаях происходит тепловое воздействие на материал, его плавление и испарение из зоны. В глубину отверстие растет в основном за счет испарения, а по диаметру за счет плавления стенок и вытекания жидкости при создаваемом избыточном давлении паров. В настоящее время достаточно полно разработана модель кинетики образования отверстия в непрозрачном материале, согласно которой глубина h и диаметр отверстия D определяются по формулам:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{\text{tg } \gamma}\right)^3 + \frac{3W}{\pi \text{tg}^2 \gamma \rho L_0}} - \frac{D_0}{\text{tg } \gamma}; \quad (1)$$

$$D = 2 \cdot \sqrt[3]{D_0^3 + \frac{3W \text{tg } \gamma}{\pi \rho L_0}}, \quad (2)$$

где D_0 – начальный диаметр лунки; $W = P\tau_{\text{и}}$ – энергия излучения импульсного ОКГ; P – импульсная мощность; $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса; γ – половинный угол раствора светового конуса; L_0 – удельная энергия испарения материала при $T = 0\text{K}$.

Из формул видно, что значения величин h и D нелинейно зависят от параметров, характеризующих применяемую оптическую систему (D_0 , γ), лазер (W) и природу обрабатываемого материала (L_0). Однако в большей мере величины h и D зависят от $\text{tg } \gamma$, характеризующего угол светового конуса, создаваемого оптической системой.

Геометрия отверстия существенно зависит от положения пятна относительно обрабатываемой поверхности (рисунок 3.2). В сходящемся световом пучке характерным является конический профиль отверстия, а в

расходящемся – цилиндрический. За счет неравномерности распределения излучения по сечению светового пятна и во времени в течении импульса, а также вследствие теплопроводности и гидродинамических явлений, профиль отверстия, задаваемый ходом лучей, искажается. В частности, появляется характерная воронка на входе и плавный переход от дна к стенкам, а при больших расфокусировках профиль отверстия становится параболическим.

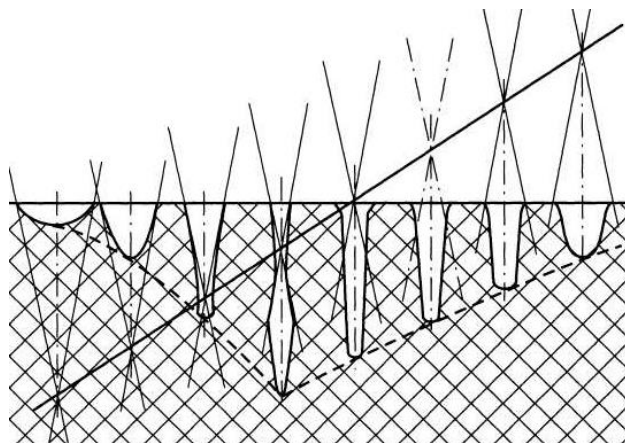


Рисунок 3.2 – Профили отверстий при различных положениях фокуса лазерного луча относительно поверхности обрабатываемой детали

Степень фокусировки, соответствующая наибольшей глубине и наименьшему диаметру, различна. Наибольшая глубина отверстий достигается при фокусировке лазерного луча на некоторое расстояние вглубь от поверхности материала. Наименьший диаметр обеспечивается при размещении фокальной плоскости на поверхности обрабатываемого материала.

Если бы механизмом разрушения было испарение вещества, то условия получения отверстия максимальной глубины h_{\max} за один импульс с энергией w_n и длительностью τ_n соответствовали бы фокусировке излучения на поверхность обрабатываемой детали, обеспечивая минимальный диаметр лунки. Наличие оплавления стенок в расходящемся пучке изменяет условия оптимальной фокусировки излучения таким образом, что для получения максимальной глубины требуется сфокусировать лазерный пучок на некотором расстоянии l_0 от поверхности вблизи материала.

Смещение фокуса l_0 зависит не только от параметров фокусирующей системы, но и от диаметра лазерного пучка на выходном зеркале лазера d , его расходимости θ и расстояния z_0 от выходного зеркала. При удалении линзы от лазера (или уменьшении выходной апертуры пучка) глубина отверстия может значительно увеличиться при оптимальном смещении фокуса линзы по

сравнению с глубиной, обеспечиваемой при фокусировке на поверхность материала.

При использовании многоимпульсного метода обработки за счет того, что импульсы в серии разделены временными интервалами, реализуется возможность изменения взаимного расположения обрабатываемой детали и фокусирующей оптической системы в процессе получения одного отверстия. При относительном смещении оптической системы и образца перед очередным импульсом на величину, равную толщине слоя, испаренного за предыдущий импульс, плотность мощности лазерного излучения на движущейся границе испарения по всей глубине отверстия сохраняется практически постоянной. Такое смещение можно проводить и непрерывно, согласуя скорость движения с частотой следования импульсов.

На рисунке 3.3 представлено изображение отверстия в керамической подложке, созданное с помощью лазерного излучения.

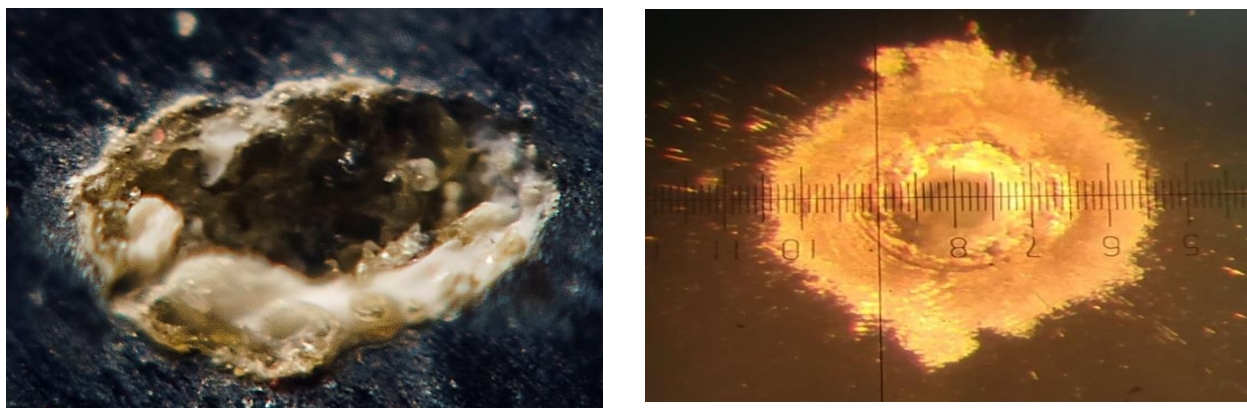


Рисунок 3.3 – Вид отверстий, созданных лазером, в кремниевой подложке

Исходя из вышеописанного, можно сказать, что использование лазера дает следующие преимущества:

1. Отсутствует механический контакт между сверлящим инструментом и материалом, а также поломка и износ сверл.
2. Увеличивается точность размещения отверстия, так как оптика, используемая для фокусировки лазерного луча, используется также и для наводки его в необходимую точку. Отверстия могут быть ориентированы в любом направлении.
3. Достигается большее отношение глубины к диаметру сверления, чем это имеет место при других способах сверления.

Используемое лабораторное оборудование

Лабораторная установка LOTIS (рисунок 3.4) состоит из источника оптического излучения, блоков регулирования энергии излучения, питания и управления, оптической системы и системы охлаждения лазера. В качестве источника оптического излучения применен квантовый генератор на алюмоиттриевом гранате с неодимом с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульсов 10 мкс и частотой следования 1-50 Гц. Для накачки активного элемента применена ИК-лампа мощностью 2 кВт. Энергия импульса лазерного излучения составляла 0,75 Дж при напряжении на лампе ОКГ 900 В и частоте импульсов 3 Гц, а средняя мощность излучения в импульсе – 3,75 кВт.



Рисунок 3.4 – Внешний вид лазерной лабораторной установки

Оптическая система формирует пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Для наводки оптического излучения и юстировки оптической системы используется маломощный газовый лазер, излучение от которого вводилось в оптическую систему формирования лазерного излучения с помощью полупрозрачного зеркала. Для позиционирования изделий применен координатный стол с двумя степенями свободы и точностью позиционирования $\pm 0,1$ мм. Управление работой лазера и координатного стола организовано от блока управления шаговым двигателем и ПЭВМ с помощью управляющей программы. В установке применена двухконтурная система охлаждения лазера с теплообменным устройством типа «вода-вода» с термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру при помощи жидкостного насоса УО-1. Схема процесса прошивки представлена на рисунке 3.5, где в расширенном варианте показана оптическая система.

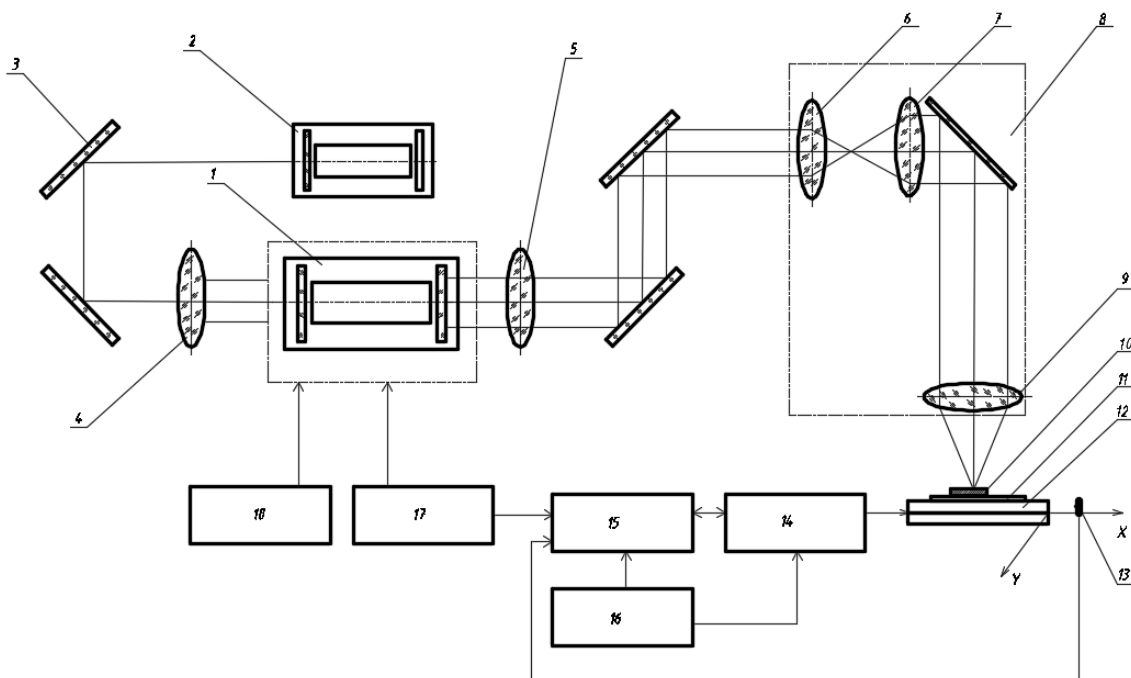


Рисунок 3.5 – Схема лабораторной установки, где: 1 - ОКГ YAG, 2 - газовый лазер, 3 - отражающее зеркало, 4 - глухое зеркало, 5 - выходное зеркало, 6 и 7 - софокусные линзы, 8 - оптическая система, 9 - фокусирующая линза, 10 - образец, 11 - асбестовая пластина, 12 - координатный стол, 13 - ограничитель, 14 - шаговый двигатель, 15 - блок управления, 16 - ПЭВМ, 17 - блок питания, 18 - система охлаждения лазера.

В качестве активной среды используется алюмо-иттриевый гранат («YAG», $Y_3Al_5O_{12}$), легированный ионами неодима (Nd). В момент вспышки лампы накачки атомы активного элемента переходят в возбуждённое состояние и испускают фотоны. Пока атом не перешёл из возбуждённого состояния, влетающий в него фотон выбивает другой фотон, при этом когерентность, длина волны, поляризация, фаза хода у этих фотонов будут одинаковыми. Глухое зеркало возвращает более 99 % излучения, выходное зеркало возвращает около 90 % излучения, при этом на выходе будет всего 10 % излучения.

Излучаемая источником накачки световая энергия фокусируется в активной среде и частично поглощается ею. Примесные ионы Nd^{3+} активной среды переходят в возбужденные состояния, и создается инверсия населенностей. Возникают условия для усиления светового излучения. При превышении коэффициента оптического усиления над суммарными потерями резонаторе в последнем возбуждаются электромагнитные колебания. Через полупрозрачное зеркало резонатора осуществляется отбор энергии электромагнитного поля, и на выходе оптической излучающей головки создается монохроматический направленный пучок света.

Чтобы луч лазера падал на обрабатываемую поверхность заготовки, его следует «повернуть» и «подвести» к нужной точке. Для этого используется система линз и зеркал.

Первое отражающее зеркало установлено сразу после газового лазера, отвечающего за настройку лазерной системы и прицеливание при проведении процесса. Оно отклоняет луч газового лазера на второе отражающее зеркало, которое отклоняет луч на глухое зеркало. Глухое зеркало пропускает луч газового лазера, но отражает излучение, создаваемое твердотельным лазером, стоящим далее. Отраженное излучение попадает на выходное зеркало, которое пропускает луч газового лазера и часть излучения твердотельного лазера. Далее лучи газового и твердотельного лазеров проходят две софокусные линзы и попадают на отражающее зеркало, которое установлено под углом в 45 градусов к горизонтали – оно отражает лазерный луч вниз, внутрь головки излучателя. Сама головка содержит фокусирующую линзу для создания «пятна» излучения нужной площади. Излучатель так же содержит систему перемещения головки, для настройки или изменения фокусировки (размера «пятна»). Луч фокусируется в линзе и передается на материал. Лазерное излучение воздействуя на материал производит его плавление. Наибольшая полезная мощность лазерного излучения образуется в наименьшей точке фокуса. Расположение составных частей оптической системы показано на рисунке 3.6.

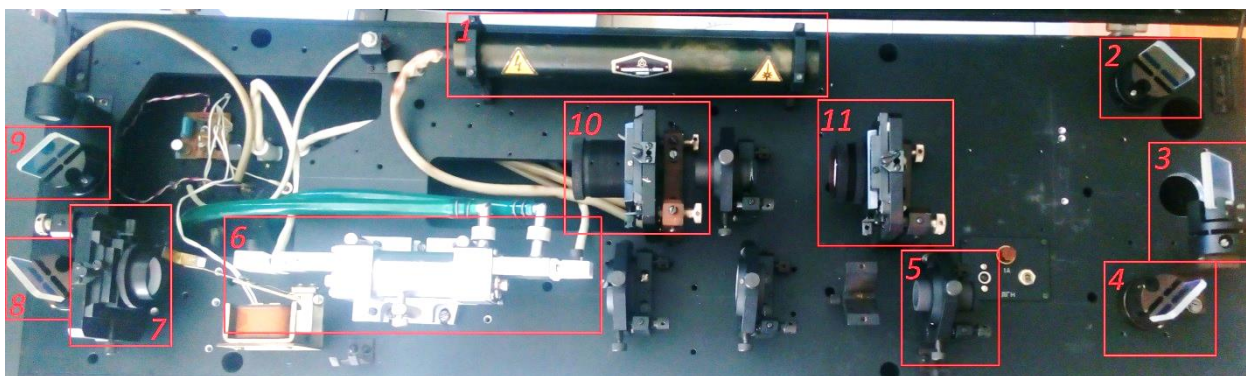


Рисунок 3.6 – Расположение составных частей оптической системы: 1 – газовый прицельный лазер; 2, 3, 4, 8, 9 – отражательные зеркала; 5 – глухое зеркало; 6 – оптический квантовый генератор; 7 – выходное зеркало; 10, 11 – софокусные линзы

Для определения размеров отверстий на кремневых пластинах используется 50X-500X USB-цифровой микроскоп Supereyes B008 (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Микроскоп Supereyes B008

Порядок выполнения работы

1. Рассчитать глубину и диаметр отверстий при следующих условиях $D_0 = 0,2$ см; $W = 1$ Дж; $\gamma = 11^\circ$; $L_0 = 13678,57$ Дж, $\rho = 2,33$ г/см³.
2. Подготовить блок питания лазера БПЛ-66/33 (рисунок 3.8) к работе. Включить питание блока, переключив тумблер «СЕТЬ». Индикаторы «СЕТЬ», «РАЗРЯД» должны загореться зеленым светом.



Рисунок 3.8 – Блок питания лазера БПЛ-66/33.

3. Переключить тумблер «СЕТЬ» на блоке питания газового лазера. Индикатор должен загореться оранжевым светом.
4. Однократно нажать кнопку «ЗАРЯД». Индикатор над кнопкой должен загореться красным светом. Индикатор «РАЗРЯД», горящий зеленым светом, должен погаснуть. Далее нажать кнопку «ДУГА». Индикатор над кнопкой должен загореться зеленым светом.

5. Выставить частоту 5 Гц при помощи переключателя «ЧАСТОТА, Hz».

6. Надеть защитные очки.

ВНИМАНИЕ! При отсутствии защитных очков запрещается приближаться к работающей установке ближе чем на 1,1 метр.

7. Убедившись, что луч прицельного лазера падает на асбестовую пластину, переключить тумблер «РАБОТА». Индикатор над кнопкой должен загореться зеленым светом.

ВНИМАНИЕ! Во время работы установки ЗАПРЕЩАЕТСЯ помещать в зону лазерного излучения посторонние предметы, части тел, снимать защитные очки, нажимать кнопки «РАЗРЯД», «ЗАРЯД», «ДУГА», переключать тумблеры «СЕТЬ», «ЧАСТОТА, Hz».

8. Проверить напряжение накачки на встроенном на лицевой панели вольтметре. Значение должно быть в пределах 0,7 - 0,8 кВ. В случае несоответствия, переключателем «УРОВЕНЬ» выставить необходимое значение. Запрещается повышать напряжение более 0,8 кВ.

9. Переключить тумблер «РАБОТА», остановив работу лазерного излучателя. Индикатор над кнопкой, горящий зеленым светом, должен погаснуть.

10. Выставить частоту 50 Гц переключателем «ЧАСТОТА, Hz».

11. Установить на координатный стол образец. Совместив зону прошивки с красной точкой прицельного лазера.

12. Надеть защитные очки.

ВНИМАНИЕ! При отсутствии защитных очков запрещается приближаться к работающей установке ближе чем на 1,1 метр.

13. Убедившись, что луч прицельного лазера падает на место запланированной прошивки отверстия, переключить тумблер «РАБОТА». Индикатор над кнопкой должен загореться зеленым светом.

ВНИМАНИЕ! Во время работы установки ЗАПРЕЩАЕТСЯ помещать в зону лазерного излучения посторонние предметы, части тел, снимать защитные очки, нажимать кнопки «РАЗРЯД», «ЗАРЯД», «ДУГА», переключать тумблеры «СЕТЬ», «ЧАСТОТА, Hz». В случае возникновения нештатной ситуации необходимо остановить работу установки с помощью тумблера «РАБОТА» и сообщить преподавателю.

14. Выполнить прошивку отверстия согласно указаниям преподавателя.

15. Переключить тумблер «РАБОТА», остановив работу лазерного излучателя. Индикатор над кнопкой, горящий зеленым светом, должен погаснуть.

При необходимости повторения опытов, повторить пункты 9-14, внося коррективы в параметры процесса, если это было указано преподавателем.

16. Нажать кнопку «РАЗРЯД», остановив работу лазерного излучателя. Вы услышите характерный щелчок. Индикаторы над кнопками «ЗАРЯД», «ДУГА», горящие зеленым и красным светом, должны погаснуть. Индикатор кнопки «РАЗРЯД» должен загореться зеленым светом.

17. Переключить тумблер «СЕТЬ» на блоке питания газового лазера. Индикатор, горящий оранжевым светом, должен погаснуть.

18. Выключить питание блока, переключив тумблер «СЕТЬ». Индикаторы «СЕТЬ», «РАЗРЯД» должны погаснуть.

19. С помощью микроскопа Supereyes B008 измерить диаметры полученных отверстий в подложках.

20. Подсоединить USB кабель микроскопа к компьютеру.

21. Запустить программу Measurement.

22. Положить тестовый образец кремневой подложки под линзу микроскопа.

23. Настроить высоту микроскопа и степень увеличения до уровня оптимальной видимости отверстия.



Рисунок 3.9 – Внешний вид отверстия на кремневой подложки с камеры микроскопа

24. Убрать образец и подложить на его место линейку. На панели инструментов сохраните изображение линейки нажав на кнопку «Capture Picture» (значок фотоаппарата). Изображение сохраняется в папке C:\Program Files\Measurement\CapPicture.



Рисунок 3.10 – Панель инструментов

25. На рабочей панели, в окне Picture появятся сохранённое изображение с названием «месяц день – номер изображения». Откройте его, кликнув на название.

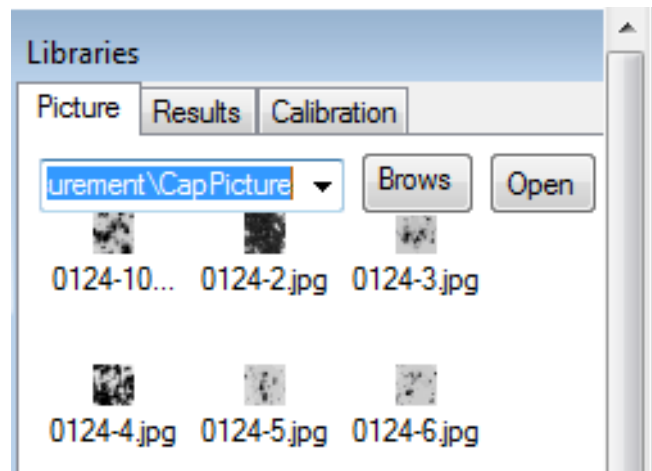


Рисунок 3.11– Список сохранённых изображений в рабочей панели.

26. На панели инструментов выберите Distance Measurement и измерьте количество пикселей в 1 мм. На рабочей панели перейдите в окно Calibration и добавьте новое правило нажав Add.

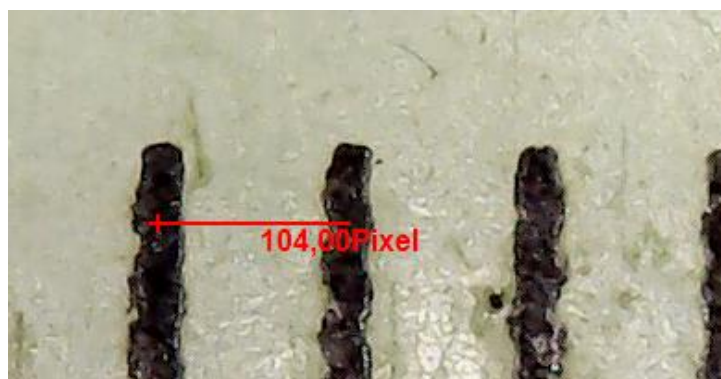


Рисунок 3.12 – Измерение расстояния в пикселях

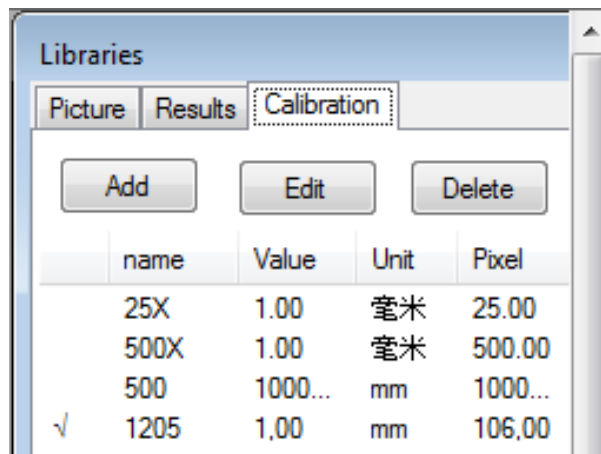


Рисунок 3.13 – Список правил в окне калибровке

27. Создайте новое правило, введя все параметры

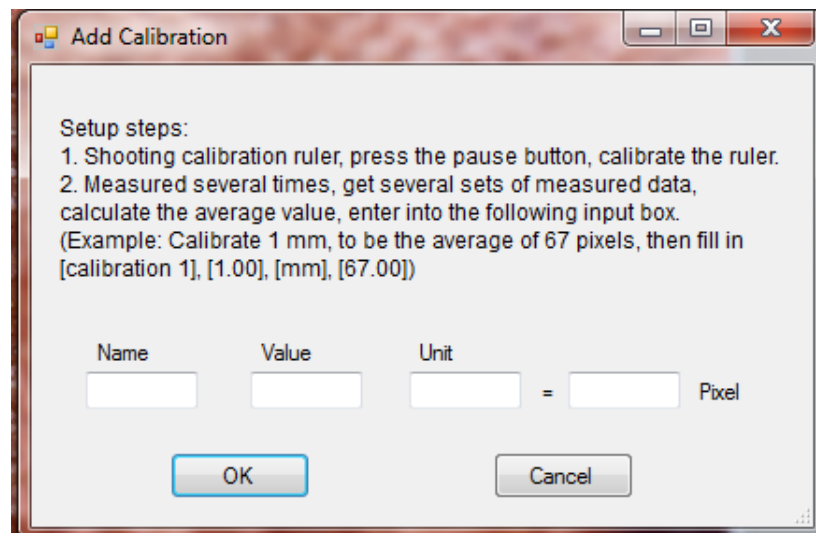


Рисунок 3.16 – Создание нового правила калибровки

28. Уберите линейку. Подложите кремнёвую подложку. Найдите отверстие. Измерьте расстояние с помощью инструмента Distance Measurement. Отредактированное изображение вместе с расстояниями можно сохранить нажав на значок Picture save as на панели инструментов.

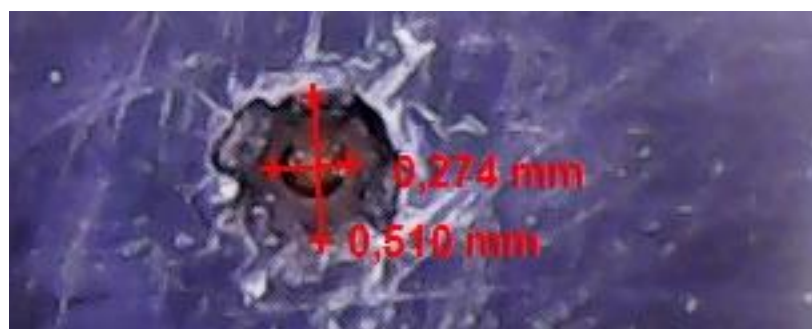


Рисунок 3.17 – Изображение отверстия с измеренными диаметрами

29. Заполнить таблицу 3.3. В качестве параметра, характеризующего данный процесс, можно использовать конусообразность отверстия

$$k = \frac{D_0 - D}{h}. \quad (8)$$

где h – толщина подложки.

Таблица 3.3 – Параметры лазерного формирования отверстий в подложке

Длина волны	Мощность, мВт	Входное отверстие D_0 , мм	Выходное отверстие D , мм	Конусообразность
532 нм	100			
	80			
	60			
	40			
1064 нм	100			
	80			
	60			
	40			

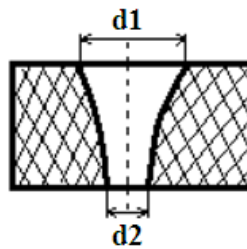


Рисунок 3.18 – Отверстие в керамическом материале: d_1 – входной диаметр, d_2 – выходной диаметр

30. Построить графические зависимости конусообразности отверстий от мощности и длины волны лазерного излучения.

Содержание отчета

1. Цель работы
2. Краткие теоретические сведения
3. Схема процесса лазерной прошивки
4. Теоретические расчеты параметров отверстий
5. Результаты измерений
6. Графики зависимостей
7. Выводы по работе

Дополнительный материал

В 1996 фирма ЛОТИС (Беларусь) и японская фирма Tokyo Instruments Inc. основали совместное предприятие ЛОТИС ТИИ. Обе компании объединили свои усилия по разработке и поставке лазерных продуктов на мировой рынок. Компания ЛОТИС ТИИ разработала установки на основе твердотельного лазера для применения в технологии лазерной обработки. **Двухимпульсные Nd: YAG лазеры с модуляцией добротности LS-2131D - LS-2134D, LS-2145D** объединяют ряд Nd:YAG лазеров с модулированной добротностью, которые обеспечивают получение на выходе двух импульсов генерации равной энергии с регулируемой временной задержкой между импульсами.

Рисунок 3.20 – Лазерные установки компания ЛОТИС ТИИ

LS-2151 Пикосекундный Nd:YAG лазер является твердотельным лазером, который имеет активную синхронизацию мод МОРА-конфигурации: задающий одномодовый генератор (МО) и мощный двухпроходный усилитель (РА). Программное обеспечение позволяет не только управлять работой



лазера, но и проводить полную диагностику как технических параметров системы управления, так и выходных параметров лазерной генерации (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Основные параметры лазера LS 2151

Параметр	Гарантированное значение
Длина волны генерации, нм	1064, 532, 355, 266, 213
Энергия импульса, мДж	1064 нм 75
	532 нм 35
	355 нм 15
	266 нм 15
	213 нм 3
Длительность импульса, пс	70–80

Частота повторения импульсов, Гц	15
Расходимость θ , мрад	0,4
Диаметр выходного пучка, мм	$\leq 9,0$
Нестабильность энергии, %	
1064 нм	2,5
532 нм	3,5
355 нм	4,0
266 нм	10
Размеры Д x Ш x В, мм	
Излучатель	650x345x143
Блок питания	512x485x177
Система охлаждения	542x485x266
Блок управления	512x485x133
Потребление электроэнергии, ВА	1200
Электропитание	220±В, 10 А, 50 Гц

Источник лазерного излучения – лазер *LS-2151* обеспечивает высокое значение удельной мощности в сочетании с высокой частотой следования вследствие низкого порога накачки и хорошей теплопроводности рабочего вещества. В состав установки входят источник оптического излучения, блоки регулирования энергии излучения, питания и управления, оптическая система и система охлаждения лазера. В качестве источника оптического излучения использован квантовый генератор на твердотельном иттрий-алюминиевом гранате с неодимом (*Nd:YAG*) с длиной волны 1,06 мкм и 532 нм, длительностью импульсов 100 пс и частотой следования 15 Гц.

Для накачки активного элемента применена ИК-лампа мощностью 2 кВт. Энергия импульса лазерного излучения составляла 0,75 Дж при напряжении на лампе ОКГ 900 В и частоте импульсов 3 Гц, а средняя мощность излучения в импульсе – 3,75 кВт. Оптическая система формировала пространственные характеристики пучка как инструмента обработки. Фокусное расстояние составляло 150 мм. Для наводки оптического излучения и юстировки оптической система использовался маломощный лазер, излучение от которого вводилось в ОС формирования лазерного излучения с помощью полупрозрачного зеркала.

Для отключения лазера использовался блок управления с помощью фотодатчика, находящегося под подложкой. Блок управления БУ 2 позволял регистрировать температуру с высокой точностью в диапазоне от 20 до 800 °С и автоматически управлять процессом формирования отверстия. Температура нагрева на поверхности подложки измерялась измерителем ИМ1 с помощью температурного датчика, закрепленной на подложку.

Исследование процесса лазерного формирования отверстий в кремниевой подложке толщиной 250 мкм и диаметром 40 мм с количеством отверстий 10. Кремниевую подложку устанавливали на кольцевую подставку, которая закреплена на координатном столе. Нестабильность мощности излучения была не более 3,5%, а расходимость излучения меньше 0,4 мрад, нестабильность размеров пятна излучения на поверхности подложки не более 2%. В процессе исследования диаметр пятна изменялся на пределах 0,1–0,2 мм, скорость перемещения подложки – 7–10 мм/с. Качество сквозных отверстий оценивали с помощью микроскопа при увеличении $32\times$.

Для лазерного формирования отверстий в кремниевой подложке использовались лазерные установки компании LOTIS TP с длиной волны 1,06 мкм и 532 нм, длительностью импульсов в диапазоне 80 пс – 15 нс и частоте импульсов 15 Гц. Для контроля мощности лазерного излучения применен измеритель мощности излучения *LabMax-Top* (компании *COHERENT*) с сенсорами *EnergyMax*. Измеритель *LabMax-Top* обеспечивает контроль излучения с длиной волны от 190 нм до 12 мкм, измерения мощности от нВт до кВт, энергии от нДж до Дж при частоте импульсов до 10 кГц.

Пикосекундный лазер с длиной волны 532 нм дает лучше результат сокращения времени обработки, чем наносекундный лазер. Объясняется это энергией, поглощаемой свободными электронами. При использовании излучения наносекундного лазера, создающего плотность $q = 10^{11}$ Вт/см², концентрация свободных электронов на поверхности подложки материала достигает $N \sim 10^{22}$ см⁻³. При воздействии излучения в зоне обработки электроны получают энергию и переходят на различные уровни зоны проводимости, а затем полученная энергия трансформируется в тепловую.

Установлено, что при одинаковом времени выполнения $t = 3$ с, лазер с длиной волны 1064 нм потребляет 100 мДж/излучения, а лазер 532 нм потребляет на 10 раз меньше (около 10 мДж). При одинаковой энергии излучения, лазер с длиной волны 532 нм сокращает время формирования в 2 раза. Экспериментально доказано, что лазерное излучение с длиной волны 532 нм позволяет формировать отверстия с коротким временем, при этом потребляет меньше мощность (до 35 мВт/излучение) в сравнение с лазером 1064 нм.

Анализ зависимости показывает, что применение пикосекундного лазера с длиной волны 532 нм более эффективно, поскольку сокращается почти в 2 раза время обработки, улучшается качество формируемого отверстия в кремниевой подложке, зона термического влияния уменьшается на 30–40%. Для кремния, обладающего большей теплопроводностью, необходимо

увеличить частоту импульсов и время обработки в сравнении с поликором в 4 раза.

Контрольные вопросы

1. 3D-модули, особенности конструкции, перспективы, применение.
2. Способы создания отверстий в 3D-модулях.
3. Способы создания отверстий лазером.
4. Физико-кинетическая модель прошивки отверстия.
5. Влияние параметров обработки и фокусировки на диаметр и глубину отверстий.
6. Преимущества и проблемы лазерной прошивки отверстий.

Литература

1. Вейко, В.П. Сборник задач по лазерным технологиям / Вейко В.П., Шахно Е.А. Изд. 3–е, испр. и дополн. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 67 с.
2. Соколова, Т.Н. Лазерная размерная обработка материалов, применяемых в электронной технике / Т.Н. Соколова, Л.А. Сурменко. –М.: ЦНИИ Электроника.– 1988. – 71 с.
3. Ланин, В.Л. Лазерное формирование отверстий в кремниевых подложках 3D электронных модулей / В.Л. Ланин, С. Волк, А. Первенецкий // Технологии в электронной промышленности, 2019. – № 2. – С. 65–67.