

## ЛЕКЦИЯ 1. ВВОДНАЯ.

В большинстве технологических процессов обработки материалов (исключая лазерную химию) интенсивность облучения и ее пространственно-временные характеристики играют определяющую роль, в то время как такие фундаментальные свойства лазерного излучения, как когерентность и монохроматичность, как правило, не проявляют себя. Воздействие лазерного излучения сопровождается процессами тепло- и массопереноса, развитие которых зависит от энергетических и пространственно-временных характеристик излучения. В процессах лазерной технологии длина волны излучения играет существенную роль. Дело не только в дисперсии поглощения окружающей атмосферы, но и в дисперсии поглощающей способности обрабатываемых тел. Кроме того, пороги пробоя атмосферы вблизи поверхности тел могут различаться на два порядка для излучения с длиной волны 0,69, 1,06 мкм и для излучения CO<sub>2</sub>-лазеров (10,6 мкм). Зависит от длины волны излучения и глубина проникновения лазерного излучения в объем конденсированной среды, что существенно, например, при обработке пленок. При воздействии сфокусированного мощного лазерного излучения на поверхность твердого тела вещество нагревается, плавится, частично испаряется и ионизируется. В неоднородно нагретом веществе возникает сложное течение жидкости, паров, плазмы и окружающего газа. Перемещение вещества оказывает, в свою очередь, существенное влияние на распространение лазерного излучения, приводя к изменению фокусировки и условий поглощения и отражения излучения. Возникает сложное многофазное гидро- и газодинамическое течение, согласованное с распространением лазерного излучения в сильно поглощающей и преломляющей оптически нелинейной среде. Соответствующий выбор длины волны излучения, интенсивности, времени воздействия, вида и давления окружающей атмосферы позволяет осуществлять различные технологические процессы, ряд которых принципиально невозможен без применения лазера.

### **А. Классификация лазерных технологических процессов**

При анализе процессов воздействия лазерного излучения на материалы часто используют понятие «критической интенсивности» или «критической плотности потока». Этот термин в определенной степени условен, так как связан с понятием разрушения

вещества, также имеющим условный характер. В лазерной обработке под началом разрушения чаще всего подразумевают плавление поверхности тела, хотя необратимые изменения в объеме большинства материалов происходят и при нагреве ниже температуры плавления.

Критические интенсивности  $q_c^{(i)}$  [Вт/см<sup>2</sup>] ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) являются основой, используя которую, можно классифицировать разнообразные технологические процессы и рассматривать их последовательно при переходе от одной критической интенсивности к другой. Отметим, что такой подход к анализу процессов лазерной технологии не является единственным.

Обычно принимают, что  $q_c^{(1)}$  - критическая интенсивность, необходимая для достижения к концу импульса излучения на поверхности тела температуры плавления,  $q_c^{(2)}$  - критическая интенсивность, соответствующая достижению температуры кипения,  $q_c^{(3)}$  - критическая интенсивность, выше которой процессы испарения преобладают над переносом тепла в конденсированную среду,  $q_c^{(4)}$  - критическая интенсивность, выше которой над поверхностью возникает плазменный факел, а вглубь материала распространяется ударная волна. Возможно использование и других условий критической интенсивности, например, для реализации глубинного проплавления и т.д.

Для металлов величина  $q_c^{(1)}$  лежит в диапазоне  $10^4 \div 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> при длительности импульса лазерного излучения  $\sim 1$  мс. На этом уровне интенсивности лазерного излучения можно осуществлять термическую обработку большинства металлов.

На рисунке 1 предложена общая схема импульсных лазерных процессов. В определенной степени эта схема пригодна и для технологических процессов с воздействием непрерывного излучения, если под временем воздействия подразумевать не длительность импульса, а время прохождения через данную точку луча, определяемое скоростью движения луча.

Рассмотрим схему подробнее. При нагреве ниже температуры плавления возможна закалка и термоупрочнение сталей и сплавов, а также геттерирование и отжиг дефектов в ионно-имплантированных слоях полупроводников. Плавление тонкого поверхностного слоя открывает возможности для получения покрытий, поверхностной очистки при плавлении, создания на поверхности металлических стекол и проведения химико-термических процессов, приводящих к созданию новых веществ.

Если плотность мощности превышает  $q_c^{(3)}$ , то в газовой среде вблизи поверхности тел



Рис. 1: Классификация лазерных технологических процессов по плотности мощности

возможна реализация процессов лазерно-плазменной обработки (разложение веществ, синтез соединений, упрочнение материалов, окисление, восстановление).

При  $q > q_c^{(4)} \sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> и длительности импульса в десятки наносекунд возможно упрочнение поверхностного слоя толщиной в единицы и доли микрометров под действием ударной волны, обусловленное генерацией структурных дефектов (дислокаций, смещенных атомов и т.д.).

Соответствующий выбор плотности мощности излучения  $q$  и времени воздействия  $\tau_i$  излучения определяют проведение того или иного технологического процесса. Например, при плотностях потока, обеспечивающих плавление поверхности, выбор достаточно малых времен воздействия приводит к быстрому охлаждению поверхностных слоев, что позволяет получать металлические стекла или поверхности с аморфной структурой. чередование областей сжатия и растяжения в ударной волне создает структуры  $p-n$  переходов в полупроводниковых материалах и т.д. Наряду с созданием необходимых плотностей потока для проведения того или иного технологического процесса требуется обеспечить также соответствующий энергозатрат (или необходимую плотность энергии).

На рис.2 приведена обобщенная диаграмма, которой показаны области значений плотности мощности  $q$ , соответствующие различным видам лазерной обработки металлических материалов: 1 - ударное упрочнение; 2 - сверление; 3 - сварка с глубоким проплавлением; 4 - закалка; 5 - получение аморфных структур. Цифры на пунктирных линиях означают плотность энергии излучения  $Q$  (Дж/см<sup>2</sup>). Перечисленные технологические процессы относятся как к металлам, так и к полупроводниковым материалам. Рассмотрим подробнее технологические процессы лазерной обработки полупроводниковых материалов.

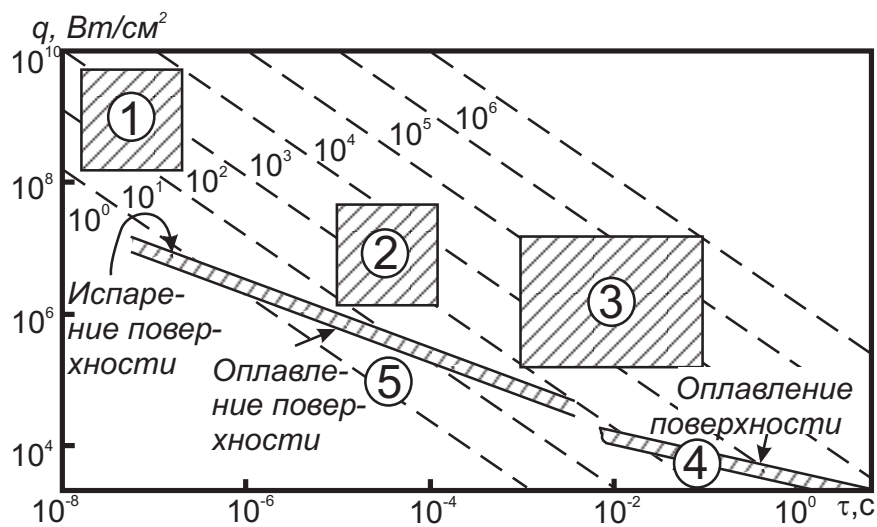


Рис. 2: Обобщенная диаграмма классификации лазерных технологических процессов по плотности энергии

Отжиг. В последние несколько лет это наиболее быстро развивающаяся область применения лазеров, заключающаяся в устранении повреждений в полупроводниках, вызванных имплантацией ионов при производстве интегральных схем. Эксперименты показали, что эффективность лазерного отжига дефектов, возникающих при ионной имплантации, по большинству параметров выше, чем традиционных методов отжига в диффузионных печах, поскольку при лазерном отжиге нагревается только слой с повреждениями  $h \sim \sqrt{a\tau_i}$  ( $a$  - коэффициент температуропроводности), свойства подложки не ухудшаются.

Легирование. Значительное преимущество - неравновесный характер термодинамики плавления при нагреве лазерным импульсом. Резкий рост пределов растворимости примесей Sb, B, P, Ga, As в кремнии. Например, концентрация Te в GaAs при им-

пульсной обработке превышает максимальный предел растворимости более чем в 10 раз. Создание тонких линейчатых структур. Различие в поглощении областей с низкой и высокой концентрациями примесей приводит к получению тонких линейчатых структур на легированном кремнии.

Геттерирование. Использование лазерного излучения для создания на обратной стороне полупроводниковых пластин дефектов, способных собирать загрязнения. Такое воздействие может осуществляться несколько раз в процессе обработки пластин.

Образование силицидов. Электрические контакты и токопроводящие дорожки на кремниевых полупроводниках создается силицидами металлов. После осаждения тонкого слоя металла на кремниевую подложку система «металл-кремний» нагревается лазерным импульсом до температуры прохождения химической реакции без нагрева соседних структур.

Окисление. Импульсный лазерный нагрев поверхности полупроводниковых пластин в атмосфере кислорода или на воздухе приводит к селективному окислению поверхности по заданному рисунку.

Травление. Удаление части материала (тонкой пленки) с помощью испарения лазерным лучом по заданному рисунку или обработка поверхности светом (УФ-диапазон) с изменением физических свойств и последующим химическим травлением (фотолитография).

Очистка поверхности. Термическая десорбция поверхностных загрязнений при плавлении поверхности полупроводника лазерным лучом (аналог метода зонной очистки).

Осаждение тонких пленок. Использование лазерного излучения как источника нагрева мишени приводит к высокой степени ионизации вещества (при  $q \geq q_c^{(4)}$ ), высоким скоростям осаждения и роста пленок, возможности сохранения сложного стехиометрического состава многокомпонентных соединений. Улучшение свойств структуры. Снижение концентрации дефектов за счет импульсной перекристаллизации может активно использоваться для улучшения структурных свойств.

Скрайбирование. Надрезание полупроводниковых пластин лазерным лучом с последующим механическим разломом позволяет эффективно разделять готовые структуры на отдельные микросхемы.

Подгонка. Использование лазерного луча для подгонки отдельных элементов микросхем (конденсаторов, сопротивлений) по контрольным параметрам.

В лазерной технологии металлических материалов также можно выделить ряд высокоэффективных процессов.

Упрочнение. Структура упрочненного слоя, возникающая в результате действия лазерного излучения, характеризуется высокой дисперсностью, аномально большой твердостью, пониженной химической активностью, что оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики упрочненных материалов - износостойкость, фрикционные свойства, механические характеристики, теплостойкость, величину и характер распределения остаточных напряжений.

Сварка. Использование установок относительно невысокой мощности дает возможность осуществлять высококачественную скоростную точечную сварку, дающую существенные экономические преимущества. С помощью лазеров можно осуществлять шовную сварку разнообразных материалов - кобальта, стали, алюминия и титана - с принципиально различными теплофизическими свойствами. В зависимости от материала варьируется энергия в импульсе.

Пайка. Лазерная пайка обеспечивает такое преимущество, как легкий контроль времени нагрева материала и дозировки энергии лазерного излучения. Лазерным методом можно выполнять локальную пайку, передавая излучение через оптическое волокно. Для одновременной пайки на нескольких участках лазерный луч может быть расщеплен с помощью зеркала и менять свое направление с помощью оптического переключателя. Автоматизация процесса пайки осуществляется за счет введения таймера для контроля времени пайки, газового лазера и робота, перемещающего оптическое волокно в прямоугольных координатах.

Легирование. Высокие скорости нагрева и охлаждения облучаемого материала позволяют получить новые фазовые и структурные состояния, которые невозможно реализовать с помощью других нелазерных способов обработки. Реализация таких состояний в поверхностных слоях конструкционных материалов позволяет значительно улучшить их механические (износоустойчивость, микротвердость, трибология) и электрохимические (коррозионная стойкость) свойства. Легирование может осуществляться из твердой, жидкой и газообразной фазы.

Оплавление поверхностного слоя. Нанесение на поверхность детали тонкого слоя отличающегося по свойствам металла (или материала) и последующее воздействие на него лазерным импульсом (плакирование) позволяет создать на поверхности защитное

покрытие. Возможно просто оплавление тонкого слоя для устранения ряда дефектов поверхностной обработки.

Получение металлических стекол. Высокая скорость охлаждения ( $dT/dt \geq 10^9$  К/с) расплава на поверхности может привести к аморфизации поверхности металла и образованию металлического стекла. Металлические стекла относятся к структурно-чувствительным веществам, их свойства сильно отличаются от свойств кристаллических материалов того же состава. Из-за отсутствия границ зерен у металлических стекол существенно выше коррозионная стойкость и сопротивление износу. Их магнитная проницаемость выше, чем у кристаллических материалов, что важно для применения в ряде приборов. Практически наиболее доступно получение металлических стекол сплавов, таких, как железо с бором, никель с ниобием, титановые сплавы и др.

Получение отверстий. Применение импульсных твердотельных лазеров позволило на новом уровне решить проблему формирования (сверления) отверстий малого диаметра в таких трудно обрабатываемых материалах, как рубин, корунд, алмаз, твердые керамические сплавы и т.д. Присущие лазерному сверлению недостатки, связанные с относительно невысоким классом точности поверхности отверстий, в последнее время активно преодолеваются за счет выбора одномодовых режимов генерации лазера, оптимизации оптических схем фокусировки лазерного луча и использования легко испаряемых подложек.

Лазерная обработка пленок. Для снижения термического искажения рисунка подложки при обработке пленок обычно используют короткие ( $\sim 10$  нс) лазерные импульсы. Обработка пленок лазерным излучением находит применение в электронном и оптическом приборостроении для получения рисунков тонкопленочных микросхем и фотошаблонов, оптических шкал, сеток, для записи информации и т.д. Термохимическая обработка. Под такой обработкой понимают совокупность разнообразных процессов (разложение, окисление, восстановление, синтез), протекающих на поверхности вещества при обработке в газовой среде. В этом случае лазерное излучение используется как интенсивный источник локального нагрева, который инициирует соответствующую термохимическую реакцию в зоне его воздействия. Практическая значимость термохимической обработки связана с возможностями применения этих процессов в микроэлектронике, радиоэлектронике и ряде других областей.

Лазерно-плазменная обработка. При плотности потока лазерного излучения, превы-

шающего критическое значение  $q_c^{(4)}$ , над поверхностью материала образуется эрозионный плазменный факел. Величина  $q_c^{(4)}$ , а также глубина испаренного слоя определяются не только длительностью воздействия и свойствами материала, но и составом и давлением атмосферы, окружающей обрабатываемое изделие. Совокупность процессов, протекающих в этих условиях, называется лазерно-плазменной обработкой, если над поверхностью происходит оптический пробой газа и развивается плазменный сгусток, содержащий ионы как обрабатываемого материала, так и окружающего газа. Совместное воздействие лазерного излучения и плазменного сгустка приводит к направленному изменению поверхностных свойств вещества мишени, обусловленному как химическими реакциями на поверхности, так и проникновением газа в поверхностный слой расплава. Подбор вещества мишени, состава и давления газа позволяет синтезировать такие соединения, как нитриды металлов (в атмосфере азота), карбида (в атмосфере углекислого газа или метана), восстанавливать металлы, разлагать вещества в атмосфере нейтральных газов и создавать в локальной зоне слои вещества определенного состава.