

ной средой. Наиб. удобными здесь оказались газовые лазеры, т. к. их среда из-за малой оптич. плотности не вносит заметных искажений даже при значит. нагреве в процессе работы.

Практически Л. м. удалось построить только после появления импульсных лазеров на парах металлов. В 80-е гг. в качестве УЯ в основном используется усиливающий элемент лазера на парах меди, обеспечивающий усиление на двух линиях с $\lambda=510,6$ нм и 578,2 нм. С ним удаётся получать эфф. усиление за один проход $\approx 10^4$. При значит. увеличении входного сигнала усилитель насыщается, и усиление падает. Это приводит к появлению ряда особенностей, не свойственных обычным оптич. системам. Так, напр., при значит. насыщении световая мощность на выходе системы весьма слабо зависит от входного сигнала, а значит, и от светосилы системы. Имеются и др. особенности, связанные с возникновением разл. нелинейных эффектов в усилителях при больших мощностях входного сигнала.

Большое усиление и высокий уровень выходной ср. мощности УЯ на парах меди позволил получать изображения микрообъектов с линейным увеличением $>10^4$ и на экранах размерами 10—20 м², что недоступно для обычных микропроекторов.

Особый интерес представляет возможность получения усиленных по яркости цветных изображений. Для этого необходимо иметь УЯ, как минимум, для трёх основных цветов: красного, зелёного и синего. Для зелёной и красной областей спектра можно применять уже имеющиеся УЯ на парах меди и золота, а для синей области спектра ещё пужно такой усилитель создать.

Лит.: Петраш Г. Г., Казарян М. А., Оптические системы с усилителями яркости, «Природа», 1979, № 4, с. 54; Петраш Г. Г., Усилители яркости для оптических приборов, «Вестн. АН СССР», 1982, № 2, с. 66. Г. Г. Петраш.

ЛАЗЕРНЫЙ ОТЖИГ — в узком, первонач. смысле восстановление под действием лазерного излучения кристаллич. структуры приповерхностных слоёв полупроводников, нарушенной ионной имплантацией; открыт в 1975 в СССР [1]. Под Л. о. в широком смысле понимают структурные изменения, возникающие на поверхности полупроводников, металлов и диэлектриков под действием как импульсного, так и непрерывного лазерного излучения. При действии на полупроводник лазерного излучения с энергией кванта больше ширины запрещённой зоны поглощение света происходит в тонком приповерхностном слое толщиной $\sim 10^{-4}$ — 10^{-6} см. При импульсном воздействии, когда интенсивность излучения велика ($I \approx 10^6$ — 10^{12} Вт/см²), в этом слое происходят быстрые (в пико-, нано- и даже субнано-секундном масштабе времени) фазовые превращения: плавление — отвердевание, фазовые переходы аморфное твёрдое тело — кристаллы и кристаллы — аморфное тело. Эти превращения ведут к структурным изменениям приповерхностных слоёв, к таким, как восстановление регулярной кристаллич. структуры; аморфизация полупроводников и металлов; образование и изменение кристаллич. структуры в нанесённых на поверхность слоях; перераспределение легирующих примесей с целью создания контролируемых профилей концентрации примесей; реакции между поверхностными слоями с образованием сплавов, омических контактов, полупроводниковых плёнок; перераспределение материала на поверхности с образованием упорядоченных поверхностных структур.

Восстановление кристаллической структуры. Ионная имплантация посредством облучения полупроводников ионными пучками широко используется для контролируемого введения в приповерхностные слои легирующих примесей [2]. Столкновения ионов пучка с атомами решётки приводят к нарушению кристаллич. структуры в приповерхностном слое толщиной $l_{\text{импл}} < 1$ мкм, в к-ром возникают кластеры точечных дефектов, дислокации, а при больших дозах имплантации — аморфизация. Для восстановления кристаллич. структур обычно имплантированные образцы помещают

в печь при темп-ре $T_{\text{отж}} \approx 10^3$ К на время $\tau_{\text{отж}} \approx 20$ —40 мин, в течение к-рого происходит твердофазная рекристаллизация нарушенного слоя (т. н. тепловой отжиг, ТО). За столь большие времена примеси успевают продиффундировать в глубь образца на расстояние до 1—2 мкм. Однако технология изготовления интегральных схем требует ограничения толщины легирующего слоя на уровне 0,1 мкм. Л. о., а также быстрый ТО широкополосными некогерентными источниками излучения отвечают этим требованиям.

При Л. о. лазерный пучок направляется на имплантированную поверхность (рис.) и под его воздействием локальное восстановление кристаллич. структуры; для получения больших, непрерывно отож-

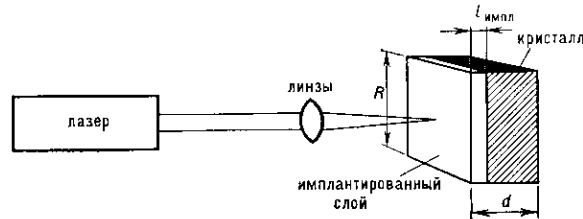


Схема проведения лазерного отжига: d — толщина образца; R — поперечный размер образца; $l_{\text{импл}}$ — толщина имплантированного слоя.

жённых областей лазерный пучок либо сам образец сканируется.

Л. о. объясняется действием теплового механизма, в соответствии с к-рым энергия лазерного излучения, поглощаемая непосредственно электронной подсистемой, практически мгновенно (за время меньше пикосекунды) путём поэтапной электрон-электронной, электрон-фононной и фонон-фононной релаксации передаётся в решётку и нагревает её от исходной темп-ры T_0 до значения $T_{\text{отж}}$ (1), изменяющегося во времени (аналогичный нагрев может быть создан и при облучении электронными и ионными пучками, к-рые также используются для целей ТО [6].)

В зависимости от плотности энергии импульса W , его длительности τ_n , скорости сканирования (для непрерывных лазеров), а также значений оптич. и тепловых параметров вещества реализуются два осн. режима нагрева и соответственно два режима Л. о.: импульсный Л. о. (ИЛО), при к-ром $T_{\text{отж}} > T_{\text{пл}}$ — темп-ры плавления, и непрерывный Л. о. (НЛО) в режиме теплового потока с темп-рой $T_{\text{отж}} < T_{\text{пл}}$.

При ИЛО за время $\tau_n \approx 10^{-8}$ с тепло успевает распространиться в глубь образца на длину, не превышающую длину поглощения. Для типичных наносекундных Т-лазеров, используемых при ИЛО (вторая гармоника Nd:YAG, $\lambda=0,532$ мкм; рубиновый лазер, $\lambda=0,694$ мкм, $W \approx 0,5$ Дж/см²), длина поглощения в кремнии (Si) $l_{\text{погл}}=2 \cdot 10^{-4}$ см. Длина диффузии тепла $(2\chi\tau_n)^{1/2} \approx 10^{-4}$ см $< l_{\text{погл}}$ (коэф. теплопроводности $\chi \approx 0,2$ см²/с). Концентрация тепла в тонком приповерхностном слое приводит к его плавлению при значениях W , характерных для этих лазеров. Осн. условие ИЛО заключается в том, чтобы глубина расплава $l_{\text{распл}}$ была больше $l_{\text{импл}}$, т. е. поверхностный слой должен быть расплавлен до кристаллич. подложки. Последующая жидкофазная эпитаксиальная рекристаллизация при остывании расплава приводит к восстановлению кристаллич. структуры.

Благодаря возникающим в процессе ИЛО большим градиентам темп-ры реализуются большие скорости движения фронтов расплава ($v_{\text{распл}} \approx 10$ м/с) и рекристаллизации ($v \approx 1$ м/с), так что весь отжигающий цикл проходит всего за 100 нс. Поскольку нагревом кристаллич. подложки в течение времени $\tau_{\text{отж}}$ можно пренебречь, этот режим наз. также адиабатическим.