

Цикл расплав — рекристаллизация полностью удаляет протяжённые дефекты (дислокации и кластеры точечных дефектов), но оставляет после себя довольно высокую концентрацию (10^{13} — 10^{15} см⁻³) точечных дефектов, появление к-рых, по-видимому, связано с высокой скоростью рекристаллизации при ИЛО. Перераспределение примесей в глубь образца происходит на длине диффузии в жидкой фазе $(2D_{ж} \tau_{отж})^{1/2} \approx 0,4 \cdot 10^{-5}$ см (коэф. диффузии в жидкой фазе $D_{ж} \approx 10^{-4}$ см²/с). При многократном импульсном воздействии за счёт этого эффекта может быть сформирован прямоугольный профиль распределения примесей.

Режим ИЛО (режим теплового потока) осуществляется сканированием пучка непрерывного лазера (напр., аргонового мощностью 20 Вт). Время отжига в этом режиме $\tau_{отж} \approx 1$ —10 мс. Длина диффузии тепла $(2\chi \tau_{отж})^{1/2} \approx 10^{-2}$ — 10^{-1} см, т. е. по всей толщине образца d (рис.) устанавливается градиент темп-ры, обуславливающий тепловой поток от входной грани к выходной. Распределение темп-ры в плоскости облучаемой поверхности сильно неоднородно $[(2\chi \tau_{отж})^{1/2} < R]$, где R — характерный поперечный размер образца ($R \gg d$), поэтому для получения однородного отжига необходимо сканирование луча.

При ИЛО $T_{отж} < T_{пл}$, так что отжиг происходит за счёт твердофазной эпитаксиальной кристаллизации. Ионы за время отжига успевают продиффундировать всего на $\approx 10^{-7}$ см, т. е. при ИЛО перераспределения примесей практически не происходит. Однако нек-рое количество остаточных дефектов, иногда ухудшающих электр. свойства отожжённых слоёв, всё же остаётся.

Аморфизация. Одним из наиб. важных факторов, определяющих характер отвердевания из расплава при ИЛО, является скорость движения фронта раздела жидкой и твёрдой фаз. При достаточно малых значениях v образуется кристаллич. фаза. Однако по мере роста v увеличивается число остаточных дефектов, а при превышении нек-рого критич. значения $v_{кр}$ образуется аморфная фаза (для Si эксперим. значение $v \approx 15$ м/с [4]).

Т. о., кроме восстановления регулярности кристаллич. решётки лазерное воздействие может приводить к обратному эффекту — аморфизации поверхностных слоёв полупроводников и металлов (образованию металлич. стёкол [4]). Аморфная фаза образуется потому, что при больших v атомы просто не успевают занять соответствующие места в кристаллич. решётке. Значение v возрастает с уменьшением глубины расплава, поскольку возрастает градиент темп-ры $dT/dz \approx (T_{пл} - T_0)/l_{распл}$, поэтому в режиме ИЛО можно, уменьшая интенсивность лазерного излучения ($l_{распл}$ прямо пропорциональна W), достичь критич. значения $v_{кр}$ при нек-ром кр ич. значении $W_{кр}$. Если лазерный пучок имеет гауссово распределение интенсивности по сечению $W(r)$, то аморфная фаза образуется внутри кольца, центр к-рого совпадает с центром лазерного пятна, а внутр. и внеш. радиусы r_1 и r_2 определяются из условий $W(r_1) = W_{кр}$ и $W(r_2) = W_{распл}$, где $W_{распл}$ — пороговая плотность импульса, при к-рой возможен расплав. Лазерная аморфизация получена на Si, Ge, GaAs при действии на них пикосекундных импульсов ($\lambda = 0,532$ мкм) и наносекундных импульсов в УФ-диапазоне.

При импульсном Л. о. скорость движения фронта расплава может достигать при УФ-возбуждении наносекундными импульсами значений 200 м/с, а скорость отвердевания — 20 м/с (на пять порядков выше обычной скорости роста кристалла); это даёт уникальную возможность изучения кинетики неравновесных фазовых переходов. Ещё большие скорости достигаются при возбуждении пикосекундными и фемтосекундными импульсами.

Другие структурные изменения при Л. о. Интересным физ. эффектом, связанным с изменением структуры решётки при Л. о., является взрывная кристаллизация.

Возникновение её обусловлено тем, что при кристаллизации нек-рой области выделяется скрытая теплота кристаллизации, к-рая приводит к повышению темп-ры, что ещё более увеличивает активационный процесс выделения скрытой теплоты, т. е. кристаллизацию. Процесс резко нарастает, его можно рассматривать как взрывную неустойчивость (при этом необходимо учитывать диффузию тепла). Взрывная кристаллизация наблюдается при определ. условиях как в режиме ИЛО, так и при НЛО [3, 4].

Важным эффектом импульсного лазерного воздействия на конденсированные среды является образование периодич. поверхностных структур — оптически наведённых решёток. При взаимодействии мощного лазерного излучения с поверхностью в результате вынужденного рассеяния на материальных поверхностных возбуждениях (акустических и капиллярных волнах, волнах испарения) в течение длительности импульса t_d на поверхности нарастают синусоидальные (а также более сложные) волны модуляции рельефа, что приводит к появлению нелинейного экспоненциально нарастающего во времени оптич. поглощения (поглощательная способность поверхности может возрастать более чем на порядок).

Двумя скрепляющимися когерентными световыми пучками может быть осуществлён интерференционный импульсный Л. о., к-рый приводит к созданию в приповерхностном слое полупроводника периодич. последовательности кристаллич. (отожжённых) и аморфных (неотожжённых) участков. Такая искусственная периодич. поверхностная структура, легко обнаруживаемая при дифракции падающего на неё зондирующего оптич. пучка, очень удобна для исследования условий роста поверхностных кристаллич. слоёв; она позволяет весьма точно определять пороговые значения плотности энергии и глубину кристаллизованного слоя.

Кроме необратимых решёток (оставшихся после действия лазерного импульса) наблюдаются и обратимые решётки, существующие только в течение длительности импульса. Такие обратимые решётки возникают при действии лазерных импульсов на расплавы полупроводников, на жидкие металлы. Наблюдаются не только одномерные, но и двумерные структуры, а также более сложные упорядоченные образования. Периоды ориентации решёток существенно зависят от характеристик лазерного излучения — угла падения, поляризации, частоты, энергии [5].

Несмотря на то, что Л. о. уже достаточно хорошо освоен технологически, имеется ещё ряд принципиальных физ. вопросов, касающихся экспериментов по ИЛО в наносекундном, пикосекундном и фемтосекундном диапазонах и поведению полупроводников в сильном лазерном поле (с интенсивностью 10^7 — 10^{12} Вт/см²). Это вопросы о характере и скорости электронной, электрон-фононной и фонон-фононной релаксации при генерации свободных носителей с плотностью до 10^{23} в см³ за времена (10^{-9} — 10^{-14}) с, о состоянии, в к-ром находится эта сверхплотная электронно-дырочная плазма. Не выяснен окончательно (особенно в фемтосекундном и пикосекундном диапазонах) механизм плавления кристалла под действием лазера: имеет ли он место благодаря обычному нагреву решётки или благодаря возникновению плазменно-индуцированных мягких фононных мод; происходит ли плавление после того, как полученная решёткой энергия термализуется среди всех фононных мод, или когда она остаётся сосредоточенной в коротковолновом участке зоны Бриллюэна, а фононы в центре зоны остаются холодными. Эти вопросы интенсивно исследуются теоретически и экспериментально. Для окончательного их разрешения первостепенную важность имеет адекватная эксперим. диагностика. Вопрос о физ. механизме Л. о. послужил мощным стимулом для развития разнообразных методов диагностики сверхбыстрых лазерно-индуцированных фазовых превращений на поверхности. К ним относятся: