Лекция 8

Лазерно-индуцированные неустойчивости поверхности конденсированных сред и образование упорядоченных поверхностных структур.

Оптически наведенные решетки.

1. Процесс начинается с возникновения периодически модулированного интерференционного светового поля вблизи поверхности. Это интерференция падающего поля и волны, рассеянной неоднородной поверхностью.
2. В периодически модулированном по интенсивности световом поле происходит пространственно-неоднородный нагрев поверхности.
3. При достаточно большой интенсивности лазерного излучения, неоднородный нагрев поверхности вызывает неоднородное плавление и затем испарение и вынос вещества. Интерферирующий рельеф запоминается.

При этом возможно возникновение не устойчивостей за счет положительной обратной связи: - появление рельефа поверхности определенного периода и фазы усиливают поглощение в пиковых позициях структуры, что еще более увеличивает глубину модуляции температуры и приводит к дальнейшему повышению поглощения.

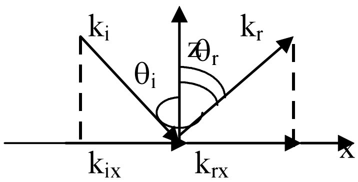
Образование интерференционного поля.

Убедимся вначале, что интерференция плоских падающей и зеркально-отраженных волн на гладкой поверхности не приводит к появлению периодически промодулированной интенсивности суммарного поля.
Для полей падающей (i) и отраженной (r) волн имеем

$$\vec{E}_i = \frac{1}{2}\vec{E}_{i0}\exp\left(-ik_x x + ik_z z\right) + к.с.,$$
$$\vec{E}_r = \frac{1}{2}\vec{E}_{r0}\exp\left(-ik_x x - ik_z z\right) + к.с.$$

Существенно, что тангенциальные компоненты одинаковы $k_{ix}=k_{rx}=k_x$. При z=0 имеем

$$\vec{E}_i = \frac{1}{2}\vec{E}_{i0}\exp\left(-ik_x x\right) + к.с.,$$
$$\vec{E}_r = \frac{1}{2}\vec{E}_{r0}\exp\left(-ik_x x\right) + к.с.$$

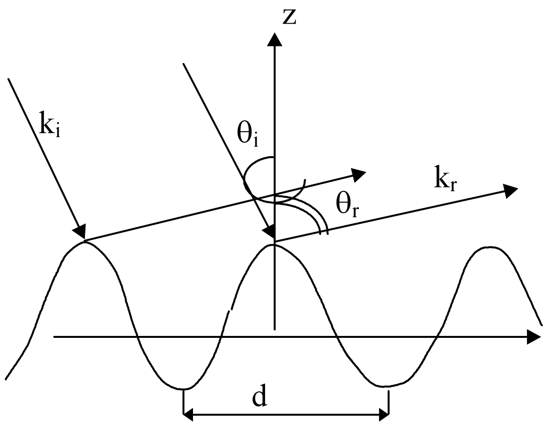


Тогда суммарное поле действительно не содержит модуляции:

$$\left|\vec{E}\right|^2 = \left|\vec{E}_i + \vec{E}_r\right|^2 = \left|\vec{E}_i\right|^2 + \left|\vec{E}_r\right|^2 + 2\,\mathrm{Re}(\vec{E}_i\vec{E}_r^*) = const.$$

Т.е. суммарное поле имеется вблизи поверхности периодической структуры, только если отраженная волна имеет отличную от падающей тангенциальную компоненту волнового вектора. Это тогда когда есть шероховатость.

Синусоидальная поверхность



Пространственный рельеф $\xi(x)=\xi_0 Cos(qx)$, где $q=\dfrac{2\pi}{d}$ волновое число периодической структуры.

Угол θ_r для дифрагированного пучка определяется из условия ? = ± mλ, m=1,2,3…- порядок дифракции (для синусоидальной решетки m=1), ? - разность хода соседних интерференционных лучей.

Из рисунка имеем

? = d sinθ_i - d sinθ_r,

домножая на 2π имеем

$$\frac{2\pi}{\lambda}(\sin\theta_i-\sin\theta_r)=\pm\frac{2\pi}{d}$$

Если $k_{i,r}=\dfrac{2\pi}{\lambda}$ и k_{ix}=k sinθ_i - k sinθ_r , то получим соотношение типа соотношения Брэгга :

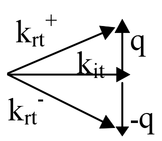
$k_{rx} = k_{ix} + q$.

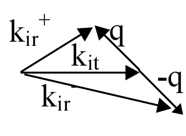
Справедливо и при произвольной ориентации по отношению к штрихам:

$$\vec{k}_{rt}=\vec{k}_{it}\pm\vec{q}$$

Вырожденный случай – луч падает “вдоль” штрихов:

$$\left|k_{rt}^{+}\right|=\left|k_{rt}^{-}\right|$$





Теперь полное поле вблизи поверхности уже содержит периодически модулированную составляющую :

$$\left|\vec{E}\right|^2=\left|\vec{E}_r^{\pm}+\vec{E}_i\right|^2=\left|\vec{E}_i\right|^2+\left|\vec{E}_r^{\pm}\right|^2+2\,\mathrm{Re}\left\{\vec{E}_{i0}\left(\vec{E}_r^{\pm}\right)^*\exp\left[i\vec{\rho}\left(\vec{k}_{it}-\vec{k}_{rt}\right)\right]\right\}=$$

$$=\left|E_i\right|^2+\left|E_r^{\pm}\right|^2+2\left|E_{i0}\right|\left|E_{r0}^{\pm}\right|Cos(\alpha^{\pm})Cos\left(qx+\varphi^{\pm}\right).$$

Здесь $\vec{\rho}=\vec{\rho}(x,y)$ - вектор в плоскости (x,y);

$\vec{q}$ - считается направлены вдоль X,

$\varphi^{\pm}$ - фазовый сдвиг в колебаниях поля падающей и дифрагирующей волн,

$\alpha^{\pm}$ - угол между векторами поляризации падающей и дифрагирующей волн,
т.е. при наложении падающей и дифрагирующей волн на поверхности начальной дифракционной решетки образуется интерференционная картина с периодом d периодом дифракционной решетки.

Дальше судьба начального периодического рельефа на поверхности поглощающего материала в поле достаточно интенсивного лазерного излучения зависит от фазового сдвига $\varphi^{\pm}$. Если он таков, что максимумы интенсивности интерференционной картины (и соответственно максимумы сопровождающей ее температуры решетки) приходятся на углубления рельефа, то с течением времени рельеф углубляется (расплав и вынос вещества). Это усиливает дифрагирующую компоненту и приводит к лавинному развитию неустойчивости поверхностного рельефа.

Наоборот, если $\varphi^{\pm}$ такова, что максимумы интенсивности интерференционной картины приходятся на максимумы рельефа – поверхность сглаживается.

Реальная шероховатость – это Фурье набор синусоидальных решеток со случайными ориентациями штрихов, случайными периодами и амплитудами.

Тогда рассеяние падающей световой волны на шероховатой поверхности – это дифракция на различных Фурье компонентах.

Однако решетки не равноправны – среди них есть “резонансные”.

Резонансы дифракции световой волны на шероховатой поверхности.

1. Шероховатая поверхность металла.

Главная роль – резонанс дифрагировавшей волны с ПЭВ.

Дисперсионное уравнение ПЭВ

$$q_{ПЕВ} = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{|\xi'(\omega)|}{|\xi'(\omega)-1|}} > \frac{\omega}{k} = k$$ волны в вакууме.

Однако ПЭВ могут возбудиться в материале с гофрированной поверхностью за счет резонанса с дифрагировавшей световой волной при определенных углах падения.

При некоторых θ_{i0} тангенциальных составляющих волнового вектора дифрагирующей компоненты, стелящейся вдоль поверхности, оказывается равной $q_{ПЭВ}$.

Для $\vec{k}_{it} \| \vec{q}$ имеем

$$k_{it}^{0} \pm q = \pm q_{ПЭВ} = \pm\frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{|\xi'|}{|\xi'|-1}}$$

Если вспомним, что $k_{it}^{0} = k\sin\theta_{i0} = \left(2\pi/\lambda\right)\sin\theta_{i0}$,

имеем

$$\sin\theta_{i0} = \pm\left(\sqrt{\frac{|\xi'|}{|\xi'|-1}} - \frac{q}{k}\right) = \pm\left(\sqrt{\frac{|\xi'|}{|\xi'|-1}} - \frac{\lambda}{d}\right)$$

т.е. при этом угле падения возбуждения ПЭВ и энергия падающего излучения уходит в ПЭВ.

Поляризация падающей волны должна иметь компоненту поля падающей волны $\vec{q}$, т.к. ПЭВ продольная волна. Для случая лазерно-индуцированной периодической структуры на шероховатой поверхности при любом угле падения θ_i найдем Фурье компонента начальной шероховатости, которая именно для этого θ_i обладает резонансным периодом d_0:

$$d_0 = \frac{2\pi}{q_0} = \lambda\left[\sqrt{\frac{|\xi'|}{|\xi'|-1}} \pm \sin\theta_i\right]^{-1}$$

Поскольку для металлов в видимом и ИК диапазоне $|\xi'| >> 1$:

$$d_0 \approx \lambda / (1 \pm \sin\theta_i)$$

В диэлектриках – резонанс с поверхностной акустической волны (ПАВ).
В жидкости – резонанс с капиллярной волны.

Развитие поверхностной структуры, механизмы обратной связи.

Эксперименты показывают, что амплитуда и статистика начальной шероховатости не играют существенной роли в развитии лазерно-индуцированной периодической структуры. Это говорит в пользу роли ПОС.