

ВЛИЯНИЕ НАКЛОННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПУЧКОВ НА КИНЕТИКУ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В.С. АРАКЕЛЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении

(Поступила в редакцию 22 марта 1996 г.)

Предложено применять наклонные ультразвуковые пучки для управления кинетикой кристаллизации. Показана эффективность воздействия наклонных ультразвуковых пучков на кинетику кристаллизации. Приведены зависимости поглощенной ультразвуковой энергии от угла падения волны и ее частоты.

1. Эффективность воздействия ультразвуковой (УЗ) волны на процесс получения монокристаллов с периодической структурой при росте их из раствора была показана в [1]. Воздействие УЗ сводится к изменению пересыщения в непосредственной близости растущей грани кристалла за счет теплового эффекта и эффекта давления УЗ. В случае применения растворов, имеющих существенную зависимость растворимости от температуры, тепловой эффект УЗ преобладает.

2. Эффективность воздействия УЗ на процесс получения кристаллов с периодической структурой определяется, кроме эффективного коэффициента распределения примеси, коэффициентов диффузии примеси и кристаллизующего вещества в растворе, толщины пограничного диффузионного слоя, также и эффективной (с учетом коэффициента поглощения УЗ раствором) добротностью УЗ резонатора.

Если грань кристалла является одной из стенок УЗ резонатора, то в процессе роста кристалла происходит регулярная смена режимов: стоячего и бегущего. В случае режима бегущей волны тепло равномерно распределено вдоль оси резонатора, в то время как в режиме стоячей волны источники тепла локализованы в пучностях смещения на расстоянии $\lambda/2$ друг от друга и на расстоянии $\lambda/4$ от поверхности

растущего кристалла. Смена режимов волны при росте кристалла приводит к изменению пересыщения, а следовательно, и к модуляции скорости роста кристалла. Это изменение пропорционально произведению коэффициента поглощения УЗ, отнесенного к квадрату частоты, на добротность резонатора. При малых коэффициентах поглощения УЗ раствором это произведение мало, поэтому достичь изменения пересыщения, необходимого для получения существенного воздействия на кинетику кристаллизации, при смене режимов волны не удастся.

3. Существенной модуляции температуры, а значит, и изменения пересыщения при малых коэффициентах поглощения можно достичь применением наклонных УЗ пучков. При наклонном падении УЗ волны на поверхность раздела двух сред в отсутствие вязкости возникает волна, бегущая вдоль границы раздела [2,3]. Ввиду наличия вязкости у реальных растворов, касательная скорость на границе за счет прилипания будет равна нулю, что приведет к появлению у границы проводимости

$$\sigma = (1-i)\omega \cos^2 \theta / (2\rho c_s^2 \zeta_v), \quad (1)$$

где θ – угол скольжения, c_s – скорость распространения УЗ волны в растворе, ω – циклическая частота, $\zeta_v = (\omega/2\nu)^{1/2}$, ν – кинетический коэффициент вязкости.

Подставляя (1) в выражение для коэффициента отражения волны при наклонном падении на границу

$$R = \frac{\sin \theta - \sigma \rho c_s}{\sin \theta + \sigma \rho c_s}, \quad (2)$$

можно определить угол скольжения, при котором наблюдается минимум модуля коэффициента отражения:

$$\theta_{\min} = \omega / (c_s 2^{1/2} \zeta_v). \quad (3)$$

Коэффициент отражения по энергии при угле $\theta_{\min}$ приблизительно равен 0.17, что означает выделение на границе раздела около 83% энергии падающей волны.

Столь существенное выделение энергии на границе раздела обусловлено возбуждением вязкой волны, амплитуда которой быстро спадает по мере удаления от границы раздела. Зависимость поглощенной

энергии от угла падения УЗ волны и ее частоты, рассчитанная по формуле

$$\alpha = 1 - \left[\frac{\sin^2 \theta - v \omega \cos^4 \theta / c_s^2}{(\sin \theta + \sqrt{v \omega \cos^2 \theta / \sqrt{2} c_s})^2 + v \omega \cos^4 \theta / (2 c_s^2)} \right]^2, \quad (4)$$

представлена на рис.1 для случая $v \sim 10^{-4}$ м²/с. Как видно из рисунка, величина оптимального угла скольжения растет с частотой УЗ.

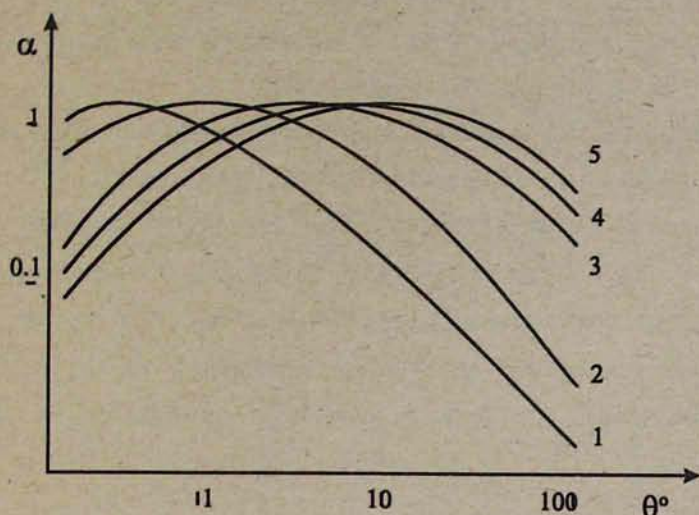


Рис.1. Зависимость энергии УЗ волны, поглощенной на границе раздела кристалл-раствор, от ее частоты и угла падения. 1. $\omega = 10^5$ Гц, 2. $\omega = 10^6$ Гц, 3. $\omega = 10^7$ Гц, 4. $\omega = 3 \cdot 10^7$ Гц, 5. $\omega = 5 \cdot 10^7$ Гц.

Проведенные расчеты позволяют оценить изменение температуры границы раздела кристалл-раствор при облучении ее наклонным УЗ пучком:

$$\Delta T_{\max} = 0,83 \sqrt{2\rho / c_p \omega \chi} v^2 c_s, \quad (5)$$

где c_p — теплоемкость, χ — коэффициент теплопроводности, v — колебательная скорость частиц. Соответственно изменяется и пересыщение:

$$\Delta C = - \frac{\delta C_0}{\delta T} \Delta T, \quad (6)$$

где C_0 — равновесная концентрация раствора.

Модуляция мощности УЗ волны приведет к модуляции пересыщения и, соответственно, скорости роста кристалла. В свою очередь, это приведет к модуляции концентрации примесей, входящих в кристалл.

4. Периодические структуры вызывают повышенный интерес ввиду наличия двух основных свойств:

а) собственные волны периодических структур представляют собой бесконечный набор пространственных гармоник, фазовые скорости которых меняются от нуля до бесконечности.

б) в периодических структурах могут распространяться волны, лежащие в пределах ограниченных полос пропускания.

Первое свойство позволяет осуществить эффективную связь волн, имеющих различные фазовые скорости, без наложения требования равенства соответствующих волновых векторов. Это свойство важно для применения при параметрической генерации, генерации второй гармоники, при необходимости обеспечения эффективной связи волн с относительно медленно движущимися зарядами и т.д. Благодаря тому, что периодическая структура обладает присущим ей волновым вектором,

$$K = 2\pi / \Lambda, \quad (7)$$

где Λ – период структуры, всегда можно подобрать такую структуру, чтобы закон сохранения импульса выполнялся при взаимодействии волн. Благодаря второму свойству в ряде систем возможна реализация распределенной связи.

Таким образом, при малых коэффициентах поглощения УЗ раствором применение наклонных УЗ пучков позволяет достичь значительного изменения пересыщения при относительно слабом источнике УЗ (или малом коэффициенте поглощения УЗ) и распределять примесь, входящую в кристалл, по любому закону, в том числе и строго периодически. Кроме того, в отличие от [4], при использовании данной методики пространственный период структуры не зависит от длины волны УЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.S.Arakelyan, A.G.Avetisyan, H.G.Nalbandyan. J. of Crystal Growth, 85, 357 (1987).
2. М.А.Исакович. Общая акустика. М., Наука, 1973, 495с.
3. С.М.Ржевский. Курс лекций по теории звука. Изд. МГУ, 1960, 335с.
4. В.С.Аракелян, А.Г.Аветисян. Кристаллография, 33, 1239 (1988).

INFLUENCE OF INCLINED ULTRASOUND BEAMS ON KINETICS OF CRYSTALLIZATION

V.S.ARAKELYAN

Ultrasound waves influence on the kinetics of crystallization is discussed. It is offered to use inclined ultrasound beams to get high efficiency.

ԹԵՔ ԸՆԿՆՈՂ ՈՒՆՏՐԱՉԱՅՆԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹԱՓՆՁԵՐԻ
ԱԶԴԵՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲՅՈՒՐԵՂԱՅՄԱՆ ԿԻՆԵՏԻԿԱՅԻ ՎՐԱ

Վ.Ս.ԱՐԱԷԼՅԱՆ

Քննարկված է ուլտրաձայնային ալիքների ազդեցությունը բյուրեղացման կինետիկայի վրա: Առաջարկվում է ազդեցության արդյունավետությունը բարձրացնելու համար օգտագործել թեք ընկնող ուլտրաձայնային ճառագայթափնջեր: