

НАБЛЮДЕНИЕ ФОНОННОЙ ФОКУСИРОВКИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КРЕМНИИ

А.А. Коломенский, А.А. Мазнев

*Институт общей физики АН СССР
117942, Москва*

Поступила в редакцию 11 марта 1991 г.

Обнаружен эффект фононной фокусировки поверхностных акустических волн в плоскостях (100) и (111) кремния. Направления каналирования визуализировались по стряхиванию нанесенных на поверхность частиц микронного размера. С помощью лазерного зонда проведены количественные измерения.

Концентрирование потока энергии акустического поля в определенных направлениях при действии точечного источника в анизотропном кристалле получило название фононной фокусировки. Этот эффект был первоначально обнаружен для высокочастотных (террагерцовых) баллистических фононов, возбуждаемых импульсным тепловым источником в объеме охлажденного до низких температур кристалла^{1,2}. Фононная фокусировка (используется также термин "каналирование акустических волн") - одно из общих свойств распространения волн в анизотропной среде и имеет место также для поверхностных акустических волн (ПАВ). Однако, насколько нам известно, прямые наблюдения самого эффекта фононной фокусировки ПАВ не проводились. Изучалось связанное с ним явление бездифракционного распространения широкоапертурного пучка монохроматических ПАВ в специально подобранных направлениях кристалла³.

В данной работе исследован эффект фононной фокусировки при распространении импульсов ПАВ с шириной спектра ~ 50 МГц, возбуждаемых лазерным излучением в образцах кремния. Отметим, что фононная фокусировка объемных волн ультразвукового диапазона при лазерном возбуждении изучалась недавно в⁴.

В качестве образцов мы использовали пластины монокристаллического кремния диаметром 100 мм и толщиной 0,5 мм. На поверхность пластин фокусировалось излучение АИГ: Nd^{3+} -лазера, работавшего в режиме гигантского импульса ($\lambda = 1,06$ мкм, $\tau = 15$ нс, $E = 10$ мДж, мода TEM_{00}). Радиус пятна фокусировки по уровню интенсивности $1/e$ составлял 7 мкм.

При воздействии лазерных импульсов на поверхность кремния происходил оптический пробой и генерировались мощные импульсы ПАВ рэлеевского типа с характерной длиной волны $\lambda \sim 100$ мкм, соответствующей длительности лазерного импульса. Для регистрации импульсов ПАВ использовался метод отклонения зондирующего луча⁵. Луч непрерывного гелий-неонового лазера ($\lambda = 0,63$ мкм, мощность 12 мВт), сфокусированный в пятно радиусом 15 мкм, падал на поверхность наклонно и после отражения регистрировался быстродействующим двухсекторным фотодиодом, сигнал с которого был пропорционален углу отклонения луча. Таким образом, лазерный зонд регистрировал угол наклона поверхности в ПАВ, пропорциональный нормальной составляющей колебательной скорости поверхности. Временное разрешение составляло 10 нс.

Перед проведением зондовых измерений картина фононной фокусировки качественно исследовалась с помощью следующей методики визуализации. Поверхность кремния запылялась частицами Al_2O_3 диаметром 1 - 2 мкм. Использовалось явление механического отрыва микрочастиц от поверхности при прохождении интенсивной ПАВ⁶. Под воздействием ПАВ поверхность движется с ускорением, и на частицы, покоящиеся в системе координат, связанной с поверхностью, действует сила инерции. Если ускорение поверхности направлено вглубь образца и $\omega_{\perp} > F_{ад}/m$, где ω_{\perp} - нормальная составляющая ускорения, m - масса частицы, $F_{ад}$ - сила адгезии частицы к поверхности, то частица оторвется от поверхности (для того, чтобы оторвавшиеся частицы не оседали обратно на поверхность, пластины кремния в наших опытах устанавливались вертикально). Таким образом, степень очистки поверхности от микрочастиц характеризует амплитуду ПАВ. Ускорения в ПАВ достигали в наших экспериментах высоких значений, $\omega_{\perp} \sim 10^8$ м/с², что как раз соответствует отрыву частиц микронного размера.

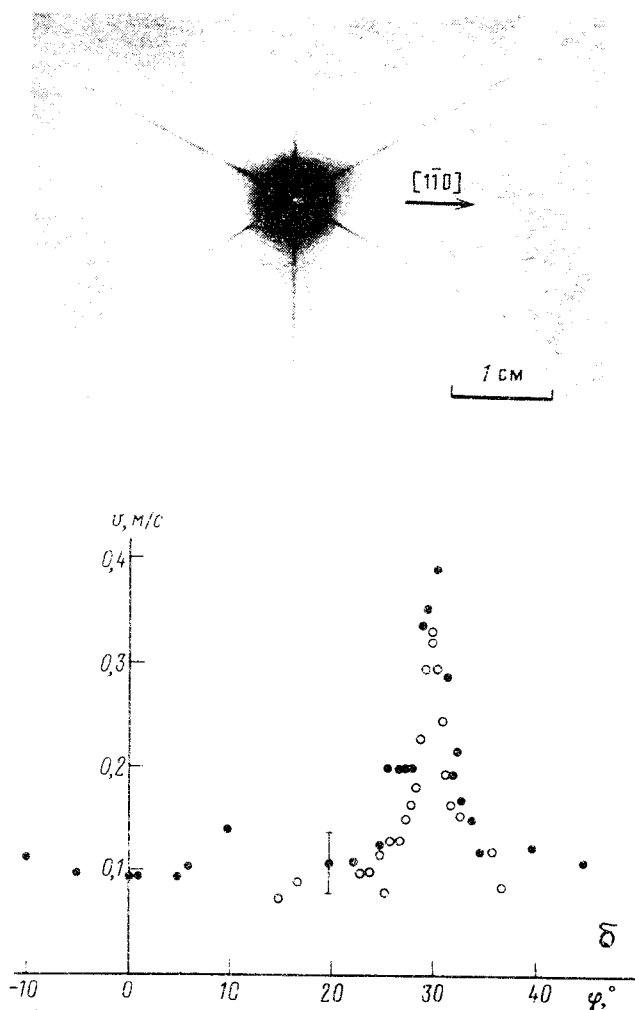


Рис. 1. Фононная фокусировка ПАВ в плоскости кремния (111): а - фотография запыленной поверхности после лазерно-акустического воздействия; б - угловая зависимость амплитуды нормальной составляющей колебательной скорости поверхности в импульсе ПАВ, полученная с помощью лазерного зонда. Темные и светлые кружки относятся к разным сериям измерений

На рис. 1а приведена фотография запыленной поверхности (111) кремния. Темные области на фотографии - это участки, очищенные от микрочастиц при прохождении ПАВ. Расходящиеся темные треки и представляют собой направления максимальной фононной фокусировки (направления каналирования). Симметрия наблюдаемой картины задается тем, что нормаль к поверхности является осью третьего порядка акустических свойств кремния и имеется симметрия относительно центра и оси $[1\bar{1}0]$. Направление максимальной концентрации акустической энергии составляет угол $\phi = 30^\circ$ с осью $[1\bar{1}0]$ и совпадает с направлением максимума фазовой скорости ПАВ. На рис. 1б приведена угловая зависимость амплитуды колебательной скорости в ПАВ, зарегистрированная лазерным зондом на расстоянии $r = 10$ мм от точки лазерного воздействия. Видно, что острый пикок лежит вблизи $\varphi = 30^\circ$, что как раз соответствует направлению каналирования, зафиксированному на рис. 1а.

Наблюдаемая картина фононной фокусировки качественно согласуется с теоретическими представлениями ⁷. Анизотропия потока акустической энергии в кристалле характеризуется коэффициентом концентрации

$$A = \left| \frac{d\varphi}{d\theta} \right|^{-1} = \left| 1 + \frac{d\Phi}{d\theta} \right|^{-1}, \quad \Phi = \arctg \frac{\partial c / \partial \theta}{c},$$

где $\Phi = \varphi - \theta$ - разность угла φ , характеризующего направление потока энергии, и угла волновой нормали θ , $c(\theta)$ - угловая зависимость фазовой скорости ПАВ. Из приведенной в ⁸ зависимости $\Phi(\theta)$, рассчитанной для ПАВ в плоскости (111) кремния, следует, что $A(\theta)$ принимает максимальное значение при $\varphi = \theta = 30^\circ$, что согласуется с результатами нашего эксперимента.

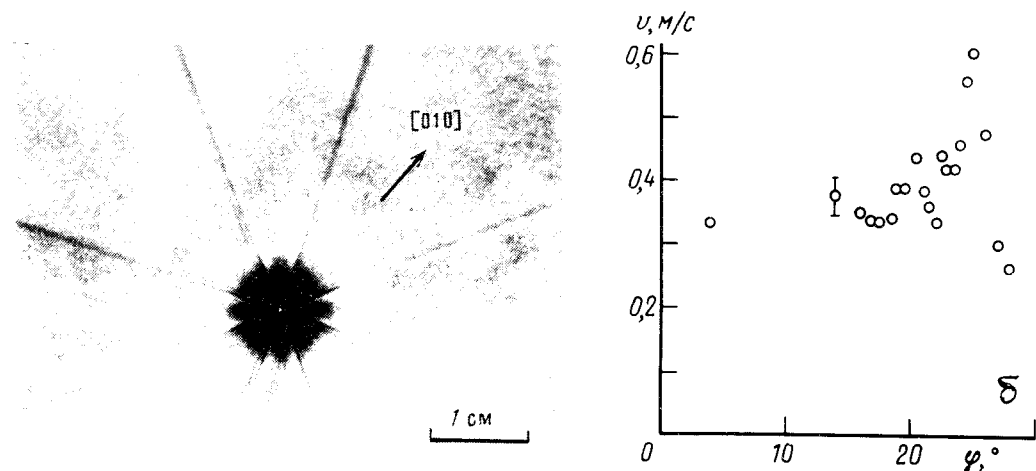


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для среза кремния (100). На рис. б угол φ отсчитывается от направления $[010]$

На рис. 2 представлены аналогичные результаты для среза (100) кремния. Нормаль к поверхности является в этом случае осью симметрии четвертого порядка, кроме того, имеется симметрия относительно оси $[010]$. Направления каналирования образуют дублет вблизи направления максимума фазовой скорости ПАВ и составляют с осью $[010]$ углы $\varphi_1 = 21,5^\circ$ и $\varphi_2 = 25^\circ$ (углы измерялись с точностью $0,5^\circ$), причем степень концентрации энергии в направлении $\varphi = \varphi_2$ существенно выше. Наличие дублета направлений каналирования, по-видимому, связано с наличием двух точек

перегиба на кривой медленностей вблизи направления максимума фазовой скорости. Однако, количественное сравнение с теорией требует дополнительного анализа.

Таким образом, нами проведены прямые наблюдения эффекта фононной фокусировки при распространении ПАВ от точечного источника в срезах (111) и (100) кремния. Предложенный нами простой метод визуализации позволяет получить двумерные картины фононной фокусировки ПАВ, а использование лазерного зонда - проводить бесконтактные количественные исследования фононной фокусировки для срезов любых монокристаллов с размерами, много большими характерной длины акустической волны. Результаты таких исследований могут найти применение в акустоэлектронике, поскольку в направлениях фононной фокусировки подавляется дифракция при распространении широкоапертурных пучков ПАВ³. Данный метод визуализации можно также использовать и для получения изображений объемной фононной фокусировки в ультразвуковом диапазоне частот. В частности, сопоставление полученных этим методом угловых распределений сравнительно низкочастотных фононов с соответствующими распределениями высокочастотных фононов^{9,10} позволило бы судить о влиянии дисперсии на фононную фокусировку.

Авторы благодарны Шкловскому Е.И. за помощь в работе и Бункину Ф.В. за обсуждение результатов.

Литература

1. Taylor B., Maris H.J., Elbaum C. Phys. Rev. Lett., 1969, 23, 416.
 2. Taylor B., Maris H.J., Elbaum C. Phys. Rev. B, 1971, 3, 1462.
 3. Slobodnic A.J., Jr., Szabo T.L. J. Appl. Phys., 1973, 44, 2937.
 4. Every A.G., Sache W., Kim K.Y., Thompson M.O. Phys. Rev. Lett., 1990, 65, 1446.
 5. Sontag H., Tam A.C. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics Freq. Contr., 1986, UFFC-33, 500.
 6. Беклемышев В.И., Коломенский Ал.А., Мазнев А.А. и др. Препринт ИОФАН N 33, 1991.
 7. Maris H.J. J. Acoust. Soc. Am., 1971, 50, 812.
 8. Акустические кристаллы. Под ред. М.П.Шаскольской. М.: Наука, 1982.
 9. Nortrop W., Wolfe J.P. Phys. Rev. B, 1980, 22, 6196.
 10. Metzger W., Huebener R.P. Z. Phys. B, 1988, 73, 33.
-