

07; 08; 12

© 1991

## СТРЯХИВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ МИКРОЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

А.А. Коломенский, А.А. Мазнев

При воздействии лазерных импульсов на поверхность твердого тела возможно возбуждение коротких мощных импульсов поверхностных акустических волн (ПАВ). При этом на поверхности достигаются столь высокие локальные ускорения, что даже для находящихся на поверхности частиц микронного и субмикронного размера силы инерции могут превышать силы адгезии, и происходит отрыв частиц от поверхности. Таким может быть один из механизмов оптико-акустической очистки поверхности от микрочастиц [1, 2]. В данной работе исследуется лазерное возбуждение импульсов ПАВ в пластинах кремния и вызываемый ими отрыв микрочастиц от поверхности пластин в вакууме и в воздушной среде.

Нами использовались гигантские импульсы лазера на  $YAG: Nd^{3+}$  ( $\lambda = 1.06$  мкм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 10 мДж, мода  $TEM_{00}$ ). Пластины монокристаллического кремния марки КЭФ4.5(100) диаметром 76 мм и толщиной 380 мкм запылялись частицами  $Al_2O_3$  и устанавливались вертикально в вакуумную камеру; лазерное излучение фокусировалось цилиндрической линзой на поверхность пластин в полосу с размерами 3 мм x 10 мкм (по уровню интенсивности  $1/e$ ), ориентированную вдоль  $\{110\}$ . Под воздействием лазерных импульсов на поверхности происходил оптический пробой. Импульсы ПАВ регистрировались по отклонению зондирующего луча гелий-неонового лазера ( $\lambda = 0.63$  мкм). Лазерный зонд регистрировал угол наклона поверхности в ПАВ, пропорциональный нормальной составляющей колебательной скорости поверхности. Эксперименты проводились при давлении в камере  $P = 10^{-1}$  Тор и при атмосферном давлении.

На рис. 1 приведена осциллограмма импульса ПАВ, зарегистрированная лазерным зондом при  $P = 10^{-1}$  Тор на расстоянии 10 мм от области возбуждения. Продифференцировав данную кривую, можно получить временную зависимость действующей на микрочастицы отрывной силы  $F_{отр} = m W_{\perp}$  ( $W_{\perp}$  - нормальная составляющая ускорения поверхности,  $m$  - масса частицы). Максимальное значение  $W_{\perp}$  составило  $1.9 \cdot 10^8$  м/с<sup>2</sup> (такое же значение получалось и при  $P = 1$  атм).

На рис. 2 приведена фотография запыленной пластины, подвергнутой лазерно-акустическому воздействию. Темная полоса получается

[ 1 м/с

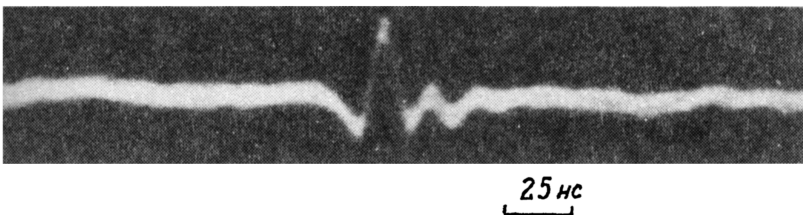


Рис. 1. Осциллограмма импульса ПАВ. Знак „+“ соответствует направлению вглубь образца.

в результате очистки поверхности от микрочастиц при прохождении ПАВ. Видно, что распространение ПАВ происходит почти без дифракции. Подсчет числа частиц на пластинах, по которым было сделано 50 лазерных выстрелов, производился на автоматизированном анализаторе поверхности „Классимат“ с разрешением 1 мкм. Частицы подсчитывались на восьми полях площадью по 0.018 мм<sup>2</sup> в неочищенной области и по трем полям в центре очищенной полоски (там же, где производилась регистрация ПАВ). Усредненные результаты измерений, приведенные на рис. 3, показывают, что в обоих случаях происходит достаточно эффективное удаление частиц диаметром  $d > 1$  мкм.

Предположим для оценки, что сила адгезии частиц к поверхности определяется силами Ван-дер-Ваальса и выражается формулой Гамакера [3]

$$F_{ад} = \frac{Ad}{12H^2},$$

где  $A$  — постоянная Гамакера (для твердых тел характерное значение  $A \sim 10^{-19}$  Дж),  $H$  — зазор между частицей и поверхностью (для оценок обычно принимается  $H=4$  Å). Тогда условие отрыва частицы от поверхности  $F_{отр} > F_{ад}$  запишется в виде

$$w_{\perp} > \frac{A}{2\pi\rho d^2 H^2}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность материала частиц. Видно, что необходимые для отрыва частицы ускорения резко возрастают с уменьшением диаметра частицы. И действительно, рис. 3 показывает, что удаление более крупных частиц происходит эффективнее. Для  $w_{\perp} = 1.9 \cdot 10^8$  м/с<sup>2</sup> и  $\rho = 4$  г/см<sup>3</sup> из (1) следует, что будут отрываться частицы

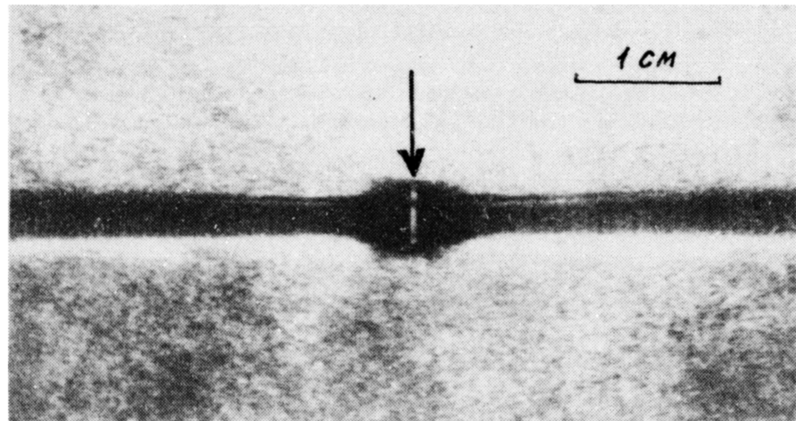


Рис. 2. Поверхность запыленной кремниевой пластины после лазерно-акустического воздействия при  $P=1$  атм. Пятно фокусировки лазерного излучения отмечено стрелкой.

с  $d \approx 0.4$  мкм, что согласуется с результатами нашего эксперимента. При атмосферном давлении удаление частиц происходит заметно хуже, чем при  $P=10^{-1}$  Тор, что связано, по-видимому, с обратным оседанием частиц на поверхность. Действительно, по нашим оценкам частица с  $d=1$  мкм, вылетевшая с поверхности с начальной скоростью 1 м/с, при  $P=1$  атм тормозится уже на расстоянии 12 мкм от поверхности; стационарная скорость падения частицы под действием силы тяжести составляет лишь 120 мкм/с (для  $P=10^{-1}$  Тор эти значения равны соответственно 4 мс и 40 см/с). Увеличение количества частиц вследствие обратного оседания проявляется на рис. 2 в виде светлой каймы вдоль нижнего края очищенной полосы (на пластинах, обработанных при  $P=10^{-1}$  Тор, этого не наблюдается).

Итак, результаты наших экспериментов показывают, что при прохождении мощных импульсов ПАВ, возбуждаемых лазерным излучением, происходит стряхивание с поверхности кремния частиц микронного размера. Мы полагаем, что данное явление может найти в дальнейшем несколько применений.

1. Очистка поверхности полупроводниковых пластин от микрочастиц в вакууме при производстве интегральных схем. Отметим, что эта проблема весьма актуальна [4, 5], но эффективного метода очистки в вакууме до сих пор не предложено. По нашим оценкам, при использовании лазерного возбуждения ПАВ возможно эффективное удаление частиц с  $d \approx 0.05$  мкм. Предел определяется тем, что увеличение амплитуды импульсов ПАВ ограничивается началом неупругих деформаций в материале, а укорочение длительности — сильным затуханием ПАВ с частотами  $\approx 1$  ГГц на расстояниях  $\approx 1$  см, поэтому максимально достижимое ускорение  $W_{max} \sim 10^{10}$  м/с<sup>2</sup>

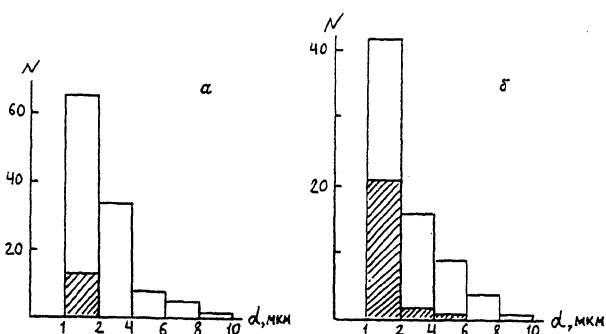


Рис. 3. Распределение частиц по размерам на площади  $0.018 \text{ мм}^2$  в очищенной (заштрихованные гистограммы) и неочищенной областях для  $P=10^{-1}$  Тор (а) и  $P=1$  атм (б).

2. Измерение сил адгезии микрочастиц к поверхности. Традиционно для измерения сил адгезии используются центрифугирование или вибрационный метод [3, 6], дающие ускорения  $\lesssim 10^6 \text{ м/с}^2$ , что не позволяет измерять силу адгезии частиц размером порядка микрона и менее. Предложенный нами метод позволит перейти к исследованию более мелких частиц, кроме того, бесконтактность возбуждения и регистрации ПАВ создает удобство при измерениях на различных образцах и в различных условиях.

3. Визуализация распространения импульсов ПАВ. Зависимость степени очистки поверхности от амплитуды ПАВ позволяет получать изображения, аналогичные рис. 2, иллюстрирующее процесс распространения ПАВ. В [7] данная методика была использована для наблюдения эффекта фоновой фокусировки при распространении ПАВ от точечного источника в кремнии.

Авторы благодарны Ю.Н. Петрову за стимулирующие дискуссии, а также Ю.В. Панфилову, Д.О. Бойкову и Р.А. Карабановой за помощь в работе.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ассендельфт Е.Ю., Беклемышев В.И., Махонин И.И., Петров Ю.Н., Прохоров А.М., Пустовой В.И. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 11. С. 1006-1009.
- [2] Беклемышев В.И., Коломенский Ал.А., Мазнев А.А., Махонин И.И., Петров Ю.Н., Пустовой В.И. Препринт ИОФАН № 33. 1991.
- [3] Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1976. 432 с.

- [4] Bowling R.A., Larrabee G.B. // J. Electrochem. Soc. 1989. V. 136. N 2. P. 497-502.
- [5] Saeki H., Ikeda J., Kohzu I., Ishimaru H. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1989. V. 7. N 3. P. 2512-2514.
- [6] Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смильга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 280 с.
- [7] Коломенский Ал.А., Мазнев А.А. // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 53. В. 8. С. 1-3.

Институт общей  
физики АН СССР,  
Москва

Поступило в Редакцию  
25 мая 1991 г.