rate sputtering with plasmatron/magnetron system - a comparison,- Vak, Techn.,

1978, 27, N 3, 75. 3. Balalikin N. I., Buch J., Katrasev V. V., Skrypnik A. V.— Production of Thin Tungsten Films.— Thin Solid Films, 1976, 38, 255.

- 4. Палатнак Л. С. и др. Образование фаз в тонких пленках W и Мо. Кристаллография, 1972, 17, 1222.
 5. Hoffman D. W., Thornton I. A. The compressive stress transition in Al, V, Zr, Nb and W metal films sputtered at low working pressures.— Thin Solid Films, 1977, 45, N2, 387.
- 6. Ведерников В. А., Гурин В. И., Данилина Т. И. Получение равномерных по толщине пленок с помощью пеннинговской газоразрядной камеры.---Приборы и техника эксперимента, 1976, № 3, 243.
- 7. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу Ти. Об электронных и ионных токах на электроды в пеннинговском разряде.- Радиотехника и электроника, 1968, 13, № 5, 902.
- 8. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В. Разряд с осциллирующими электронами и его применение в вакуумных насосах. Электроника и ее применение, 1976, 8, 43.

Поступила в редакцию 07.03.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1980, Т. 21, № 3

УДК 548.3:534.01

В. Г. ЗУБОВ, Л. П. ОСИПОВА, Н. Д. КУНДИКОВА

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ

НА ХАРАКТЕР ФОНОН-ФОНОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КВАРЦЕ

Цель настоящей работы — изучить влияние различных дефектов характер фонон-фононных взаимодействий в кристаллическом на кварце.

Исследования проведены на основе сравнения и анализа температурной зависимости частоты и ширины линий комбинационного рассеяния в спектрах необлученного кварца и кварца, облученного в реакторе потоками быстрых нейтронов 4.0.10¹⁸ и 4.5.10¹⁹ н/см².

Изучение температурной зависимости частоты и ширины линий в спектрах комбинационного рассеяния (СКР) позволяет получить информацию о характере фонон-фононных взаимодействий в кристаллах [1-4]. Фонон-фононные взаимодействия приводят к изменению собственной энергии кристалла $S_p = -\Delta \omega + i\Gamma$, действительная часть — $\Delta \omega$ которой определяет сдвиг частоты, а мнимая часть *i*Г — обратное время жизни фонона [2, 3]. В работах [2, 3] для изменения частоты линий СКР получены выражения, которые в высокотемпературном приближении (при $T > \theta_D$, где θ_D — температура Дебая) можно представить в виде

$$\Delta\omega(T, \omega) = -T \left[-\Delta\omega_A^{(4)} + \Delta\omega_B^{(3)} \right] - T^2 \left[\Delta\omega_B^{(4)} + \Delta\omega_\Gamma^{(4)} \right]. \tag{1}$$

В формуле (1) вклад в полное изменение частоты $\Delta \omega_{s}^{(3)}$ определяется трехфононными взаимодействиями, а $\Delta \omega_{2}^{(4)}$, $\Delta \omega_{3}^{(4)}$ и $\Delta \omega_{4}^{(4)}$ — четырехфононными и связаны (соответственно) с диаграммами А, Б, В, Г, представленными на рис. 1 [3]. Из соотношения (1) видно, что присутствие четырехфононных взаимодействий приводит одновременно к квадратичному уменьшению и к линейному увеличению частоты. Трехфононные взаимодействия приводят только к линейному уменьшению частоты.

Зависимость ширины линий СКР от температуры согласно [2, 3] в высокотемпературном приближении можно представить в виде

$$\Gamma(T, \omega) = \omega \left[T \Delta \Gamma_{\rm B}^{(3)} + T^2 \Delta \Gamma_{\rm B}^{(4)} \right], \tag{2}$$

где первый член определяется вкладом трехфононных, а второй — четырехфононных взаимодействий соответственно от диаграмм типа *Б* и *В* (см. рис. 1).

В настоящей работе исследования проведены на образцах кварца, облученного потоком 4,0.10¹⁸ н/см² (I) и 4,5.10¹⁹ н/см² (II).

Основные дефекты, образовавшиеся при облучении в образце I, центры окраски, точечные дефекты [5—7] и небольшое количество аморфных областей ~1% [6—8]. В образце II, облученном большим потоком быстрых нейтронов, также

образовались центры окраски, точечные дефекты, их скопления и большое количество аморфной фазы ~21% [8]. Вся совокупность радиационных дефектов в образце II



Рнс. 1. Цнаграммы, вклад от которых учитывался при выводе выражения для собственной энергия S_p в [3]: V³ — трехфононные взаимодойствия, V⁴ — четырехфононные взаимодействия



Рис. 2. Влияние температуры на частоту ω и ширицу Γ линии 466 см⁻¹: a — необлученный кварц, δ — кварц, облученный 4,5 · 10¹⁹ н/см²

существенно изменила состояние кристаллической матрицы, что проявилось, в частности, в изменении основных параметров линий СКР [8]. Совокупность же дефектов, образовавшаяся в образце I, практически не привела к изменению частоты и ширины линий СКР, но заметно сказалась на интенсивности линий и их поляризационных характерчстиках [5].

Исследования температурных зависимостей линий в СКР облученных кристаллов связаны с большими трудностями, так как нагревание приводит к полному или частичному отжигу радиационных дефектов. Наши исследования проведены на частично отожженных образцах. Наличие в них дефектов контролировалось по спектрам поглощения ч по СКР [6, 7, 9]. Отжиг проводился по методике, изложенной в [7]. Методика записи и обработки контуров линий имеется в работе [5].

Для образца I были получены температурные зависимости частоты и ширины линий 128, 206, 266, 357 и 466 см⁻¹ и показано, что эти зависимости для облученного образца I и для необлученного кварца в пределах ошибки эксперимента совпадают. Следовательно, присутствие центров окраски и точечные дефекты (основные дефекты в образце I) не влияют на характер фонон-фононных взаимодействий.

В СКР образца II достаточно интенсивной является лишь линия 466 см⁻¹ [10]. Обнаружено, что температурная зависимость частоты и ширины этой линии в спектре облученного образца II существенно отличаются от соответствующих зависимостей для необлученного кристалла (рис. 2). Причем, как видно из рис. 2, частота линии 466 см⁻¹ увеличивается при нагревании облученного образца, тогда как при нагревании необлученного уменьшается. В работах [4, 6] показано, что уменьшение частоты линии 466 см-1 в спектре необлученного кварца происходит по квадратичному закону и может быть объяснено одновременным влиянием трехфононных и четырехфононных взаимодействий.

Наблюдаемое экспериментально увеличение частоты линии 466 см⁻¹ в спектре образца II с ростом температуры, как это видно из соотношения (1), может быть объяснено увеличением вклада четырехфононных взаимодействий (которые приводят к уменьшению частоты), представленных на рис. 1 диаграммой А, и их преобладанием над вкладом четырехфононных взаимодействий от диаграммы типа В.

На рис. 2 также дано сравнение экспериментальной температурной зависимости ширины линии 466 см-1 в спектре образца II и в спектре необлученного кристалла. Из рис. 2 видно, что в спектре облученного кварца ширина этой линии увеличивается по линейному закону, а в спектре необлученного — по квадратичному (см. также [4, 11]).

Таким образом, изменение ширины линии 466 см-1, наблюдаемое при нагревании облученного образца II, определяется только трехфононными взаимодействиями, представленными диаграммой Б (в соответствии с соотношением (2)).

Итак, совокупность дефектов, образовавшаяся в кристаллическом кварце под воздействием потока 4,5 · 10¹⁹ н/см², оказывает влияние на характер взаимодействия между фононами, тогда как дефекты в кварце. облученном потоком 4,0.10¹⁸ н/см² (преимущественно центры окраски и структурные точечные дефекты), не влияют на механическую ангармоничность кристалла. В образце II по сравнению с образцом I содержится большое количество аморфных областей. Следовательно, наличие большого количества аморфных областей приводит к изменению фонон-фононных взаимодействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- I. Pein A. S., Tannenwald P. E. Temperature dependence of Raman linewidth
- Chin A. G., Fainhenward P. E. temperature dependence of Raman linewidth and shift in α-quartz.— Phys. Rev., 1969, 178, 1424—1430.
 Maradudin A. A., Fein A. E. Scattering of neutrons by an anharmonic cry-stal.— Phys. Rev., 1962, 128, 2589—2608.
 Bannach D. C. Harrison, M. H. W. Harrison, M. Harringen, M. Harrison, M. Harrison, M. Harrison, M. Harrison, M.
- 3. Валлис Р. Ф., Ипатова И. П., Марадудин А. А. О температурной зависимости ширины линии основного решеточного поглощения в ионных кристал-лах. Физ. тв. тела, 1966, 8, 1064—1078. 4. Зубов В. Г., Кундикова Н. Д., Осипова Л. П., Погосова И. С. Изу-чение ангармонических эффектов в кварце методом комбинационного рассеяния
- света. Материалы II Всесоюзной конференции по спектроскопии комбинацион-
- ного рассеяния света. М., 1978, 124-125. 5. Зубов В. Г., Осипова Л. П. О чувствительности основных параметров спектра комбинационного рассеяния α-кварца к воздействию быстрых нейтронов. Кристаллография, 1970, 15, 313—316. 6. Зубов В. Г., Осипова Л. П. О воздействии облучения быстрыми нейтрона-
- 6. Зубов Б. Г., Осипова Л. П. О возденствии солучения сыстрыми неитрона-ми на спектр инфракрасного поглощения кристаллического кварца в области 3 мк. Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1971, 12, 282-285.
 7. Зубов В. Г., Осипова Л. П., Кундикова Н. Д. Отжиг радиационных дефектов в кварце, облученном быстрыми нейтронами. Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон., 1976, 17, 628-629.
 8. Зубов В. Г., Осипова Л. П. О радиационном и температурном изменении
- ширины и интенсивности линий спектра комбинационного рассеяния α-кварца ----Кристаллография, 1977, 22, 110-114.

- 9. Зубов В. Г., Кундикова Н. Д., Осипова Л. П. Влияние радиационных дефектов на температурную зависимость интенсивности линий в спектре комби-национного рассеяния а кварца. — Укр. физ. журн., 1976, 21, 1470—1475. 10. Захарова Е. К., Зубов В. Г., Осипова Л. П. Об изменении интенсивно-
- сти линий спектра комбивационного рассеяния и. П. Обликания интенний сыстрыми и интернами. Вестн. Моск. ун-та. Физ., астром., 1972, 13, 353—355.
 Захарова Е. К., Зубов В. Г., Осипова Л. П. Температурная зависимость частоты и ширины линий комбинационного рассеяния в кристаллическом кварце. — Кристаллография, 1974, 19, 788-792.

Поступила в редакцию 03.04.79

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1980, Т. 21, № 3

УДК 517.948.3

В. Б. ГОСТЕВ, В. С. МИНЕЕВ, А. Р. ФРЕНКИН

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

В статьс [1] был предложен метод обращения для интегральных уравнений Фредгольма первого рода

$$\varphi(x) = \int_{a}^{b} K(x,y) \psi(y) \, dy \tag{1}$$

с факторизованными S-образами ядер

$$K(x, y) = \int_{p}^{q} S(\lambda, x) K_{s}(\lambda, y) d\lambda, \qquad (2)$$

$$K_{s}(\lambda, y) = \tilde{t}(\lambda, y) f(\lambda), \qquad (3)$$

где $S(\lambda, x), t(\lambda, x) - ядра интегральных преобразований (Фурье, Хан$ келя, Лапласа и т. д.) с известными ядрами обращений $\overline{S}(\lambda, x)$, $\overline{t}(\lambda, x)$.

В настоящей заметке предлагается обобщение метода на случай более сложных функциональных уравнений вида

$$\varphi(x) = \int_{a}^{b} \int_{a}^{b} dy dz K(x, y, z) \psi(y) \psi(z), \qquad (4)$$

где функция $\varphi(x)$ и ядро K(x, y, z) считаются известными, а функция ψ(x) подлежит определению. По аналогии с условием факторизуемости ядра (3) предположим, что S-образ ядра (4) факторизован, т. е.

$$K(x, y, z) = \int_{p}^{q} d\lambda S(\lambda, x) \,\overline{t}(\lambda, y) \,\overline{t}(\lambda, z) \,f(\lambda).$$
(5)

Разложив $\varphi(x)$ по $S(\lambda, x)$

$$\varphi(x) = \int_{p}^{q} d\lambda S(\lambda, x) \varphi_{s}(\lambda)$$
(6)

и подставив в (4) разложение (5), получим после изменения порядка интегрирования алгебранческую связь S-образа $\varphi(x) - \varphi_s(\lambda)$ и t - of pa- $\exists a \psi(x) - \psi_t(\lambda)$