

## КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА СУБМИКРОННЫМИ ЭПИТАК- СИАЛЬНЫМИ ПЛЕНКАМИ КРЕМНИЯ

В.С. Горелик, Р.Н. Хашимов, А.П. Виданов, В.Н. Михайлов

УДК 535.361

*По спектрам комбинационного рассеяния субмикронными пленками кремния на сапфировых подложках, полученными при температурах 103 – 678 К, установлено, что такие пленки находятся в напряженном состоянии. По наблюдаемому сдвигу частоты вычислены напряжения в пленке  $\sigma \sim 10^{10}$  дин/см<sup>2</sup>*

Исследования комбинационного рассеяния (КР) света в монокристаллах кремния были выполнены в ряде работ [1–4]. В настоящей работе впервые сообщается об исследовании особенностей КР в тонких монокристаллических пленках кремния. Исследования проводились на пленках кремния различной толщины (0,16 – 3,4 мкм), эпитаксиально выращенных в направлении [001] на сапфировых подложках с ориентацией [1012]. Для сравнения

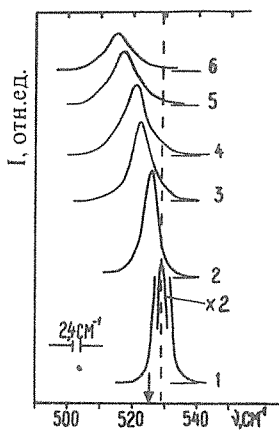


Рис. 1. Спектры КР пленок кремния при температурах 103 К (1), 300 К (2), 418 К (3), 478 К (4), 583 К (5), 678 К (6)

нами были получены также спектры КР монокристаллической пластины кремния. Спектры КР исследовались по известной схеме "на отражение" /5/ в диапазоне температур 103 — 678 К с использованием в качестве возбуждающей линии  $\lambda = 5105 \text{ \AA}$  лазера на парах меди.

На рис. 1 показаны спектры КР пленки кремния толщиной 0,6 мкм, полученные при различных температурах. Как видно из этого рисунка, в обсуждаемых спектрах проявляется линия КР с частотой  $529,0 \text{ см}^{-1}$  при 103 К (пунктир на рис. 1). Это значение на  $3,5 \text{ см}^{-1}$  превосходит соответствующее значение частоты для монокристалла кремния (стрелка на рис. 1). Как известно /4/, обсуждаемая линия КР обусловлена трехкратно вырожденным оптическим колебанием подрешеток кремния.

Из рис. 1 видно также, что при увеличении температуры наблюдается уменьшение интенсивности, уширение и сдвиг линий КР в сторону меньших

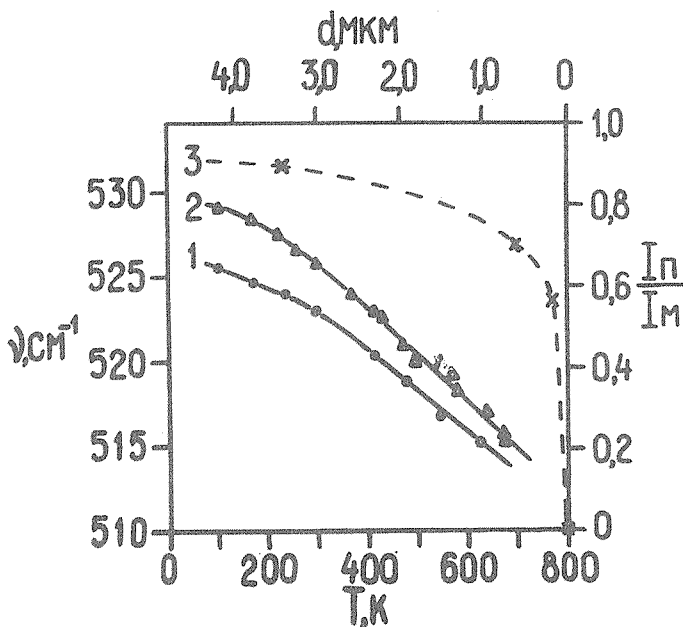


Рис. 2. Зависимости характеристик КР кремния от температуры и толщины. Кривые 1 и 2 — зависимость частоты  $\nu_1$  от температуры  $T$  соответственно в монокристалле и пленке кремния. Кривая 3 — зависимость относительной интенсивности КР  $I_n/I_m$  от толщины пленки  $d$

частот. Из наблюдаемых спектров были найдены температурные зависимости частоты  $\nu_i$  обсуждаемой линии КР в монокристалле (кривая 1 на рис. 2) и пленке (кривая 2 на рис. 2) кремния. При этом обнаружилось, что с увеличением температуры различие в частотах линий в спектрах КР пленки и монокристалла уменьшается (см. рис. 2).

Было установлено, что частота  $\nu_i$  не зависит от толщины пленки, а интенсивность линии КР увеличивается при увеличении толщины. На рис. 2 (кривая 3) показана соответствующая зависимость  $I_{\text{п}}/I_{\text{м}}$  от толщины  $d$  пленок кремния, где  $I_{\text{п}}$  — интенсивность линии КР пленки, а  $I_{\text{м}}$  — монокристалла кремния. Из этого рисунка видно, что при малых толщинах обсуждаемая зависимость является линейной, а затем выходит на насыщение при  $d \sim 1$  мкм.

Полученные результаты можно объяснить, предполагая, что при росте пленки кремния (период решетки  $5,43 \text{ \AA}$ ) на сапфире происходит сжатие решетки кремния по осям  $[100]$  и  $[010]$ . Исследование влияния давления на спектр КР монокристаллического кремния проведено в работе /1/. В соответствии с результатами этой работы компоненты тензора деформации при сжатии кристаллической решетки по осям  $[100]$  и  $[010]$  можно записать в виде:  $n_{\alpha\beta} = \eta(\delta_{\alpha 1}\delta_{\beta 1} + \delta_{\alpha 2}\delta_{\beta 2})/2$ , где  $\eta$  — деформация кристалла,  $\delta_{ij}$  — дельта-символ. Частоту оптического колебания кристаллической решетки кремния, сжатого по указанным осям, можно найти из следующего секулярного уравнения:

$$\begin{vmatrix} m\eta - \lambda & 0 & 0 \\ 0 & m\eta - \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 2q\eta - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где  $m = (p + q)/2$ ,  $p, q$  — ангармонические параметры;  $\eta$  — деформация по осям  $[100]$  и  $[010]$ ;  $\lambda = 2\nu_i\Delta\nu$ ;  $\Delta\nu$  — смещение частоты  $\nu_i$  оптической моды.

Из уравнения (1) находим частоты колебаний деформированной решетки кремния в виде:

$$\nu_d = \nu_i + (p + q)\eta/4\nu_i, \quad \nu_s = \nu_i + q\eta/2\nu_i. \quad (2)$$

Оптическая мода расщепляется на невырожденное колебание  $\nu_s$  и двухкратно вырожденное колебание  $\nu_d$ . Учитывая, что согласно /6/,

$(p - q)/2\nu_i^2 = 0,31$ ,  $(p + 2q)/6\nu_i^2 = -0,90$ , оценим величины сдвигов частот колебаний  $\nu_d$  и  $\nu_s$  и их расщепление. Из (2) получаем:  $\nu_d - \nu_i = -0,85\nu_i\eta$ ,  $\nu_s - \nu_i = -1,00\nu_i\eta$ ,  $\nu_d - \nu_s = 0,15\nu_i\eta$ .

Отсюда видно, что сдвиги частот приблизительно в 6 раз превосходят

расщепление. При температуре 300 К сдвиг частот  $\nu_d - \nu_i \approx \nu_s - \nu_i = 2,8 \text{ см}^{-1}$ . Следовательно, расщепление  $\nu_d - \nu_s < 0,5 \text{ см}^{-1}$ . Ширина щели в нашей работе была значительно больше величины  $\nu_d - \nu_s$ . Это объясняет отсутствие расщепления в наблюдаемых спектрах.

Согласно [7], коэффициент температурного расширения сапфира приблизительно втрое больше соответствующего коэффициента кремния. Поэтому при нагревании уменьшается различие в периодах решеток кремния и сапфира, а следовательно, и связанная с этим различием деформация. Согласно (2), уменьшение деформации приводит к сближению частот колебаний в спектрах КР пленки и монокристалла, что и наблюдается на эксперименте (кривые 1 и 2 на рис. 2).

Зависимость интенсивности линии в спектрах КР пленок кремния от их толщины (кривая 3 на рис. 2) можно объяснить тем, что глубина проникновения света в кремний составляет  $\sim 0,5 \text{ мкм}$ . Поэтому интенсивность линии остается неизменной при толщинах  $d$  пленок, превышающих глубину проникновения, и уменьшается при  $d < 0,5 \text{ мкм}$ .

Полученные результаты позволяют оценить механические напряжения и изменения параметров решетки, возникающие при росте пленок кремния на сапфире. Как было показано выше, при  $T = 300 \text{ К}$   $\nu_d - \nu_i \approx \nu_s - \nu_i = -0,85\nu_i\eta = 2,8 \text{ см}^{-1}$ . Учитывая, что  $\nu_i = 522,8 \text{ см}^{-1}$ , получаем величину деформации  $\eta = -0,63 \cdot 10^{-2}$ . Деформация решетки в плоскости роста может быть записана в виде  $\eta = 2\Delta a/a$ , где  $a = 5,43 \text{ \AA}$  — период решетки недеформированного кремния,  $\Delta a$  — изменение периода решетки при росте кремния на сапфире. Отсюда находим, что величина  $\Delta a \approx 0,02 \text{ \AA}$ .

Напряжение, возникающее в пленке кремния, согласно закону Гука, равно  $\sigma = B\eta$ , где  $B$  — объемный модуль упругости. Согласно [7], для сжатия по осям [100] и [010] величина  $B = C_{11} + C_{12} = 2,29 \cdot 10^{12} \text{ дин/см}^2$ . Следовательно напряжение, возникающее при росте кремния на сапфире, составляет  $|\sigma| = 1,44 \cdot 10^{10} \text{ дин/см}^2$ .

Таким образом, на основе анализа спектров КР в пленках кремния, выращенных на сапфировых подложках, удастся рассчитать напряжения, возникающие при росте таких пленок.

Поступила в редакцию 14 декабря 1983 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S. Ganesan, A.A. Maradudin, J. Oitmaa, Ann. Phys., 56, 566 (1970).
2. T.R. Hart, R.L. Aggarwal, B. Lax, Phys. Rev., 1B, 638 (1970).
3. И. И. Новак, В. В. Баптизманский, Ю. Ф. Титовец, Оптика и спектроскопия, 49, 322 (1980).

4. E. Anastassakis et al., Sol. State Comm., 8, 133 (1970).
5. М. М. Сущинский, В. С. Горелик, ЖПС, 38, 95 (1983).
6. F. Cerdeira et al., Phys. Rev., 5B, 580 (1972).
7. Акустические кристаллы, под ред. М.П. Шаскольской, "Наука", М., 1982 г.