

05; 06; 07; 12

© 1992

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ  $\text{CaF}_2$  НА  $\text{Si}(111)$   
МЕТОДОМ МАНДЕЛЫШТАМ-БРИЛЛЮЭНОВСКОЙ  
СПЕКТРОСКОПИИ

В.В. Александров, А.М. Дьяконов,  
Ю.Б. Потапова, Н.С. Соколов

Выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии слои флюорита ( $\text{CaF}_2$ ) на кремнии представляют значительный интерес для разнообразных потенциальных применений в микроэлектронике (трехмерные интегральные схемы, интеграция различных приборов на общей подложке из кремния) [1]. Для оценки кристаллического качества и упругих деформаций этих слоев применяются различные рентгеновские и оптические методы, а также обратное рассеяние ионов  $\text{He}^+$  в условиях каналирования [1, 2].

Как было продемонстрировано в ряде работ (см., например, обзор [3]), весьма плодотворным методом исследования механических свойств пленок и слоистых структур оказывается рассеяние света Мандельштама-Бриллюэна (МБ) на поверхностных и приповерхностных фононных модах. Общий анализ [3, 4] показывает, что, изучая спектры МБ в системах тонких пленок и слоистых структур, наблюдая возбуждение или отсутствие тех или иных мод, можно судить как о структуре слоев, их толщине, так и о величине соответствующих коэффициентов упругости. На упругих свойствах пленки может сказываться как ее дефектность, так и наличие деформаций.

В работах [5, 6] с помощью МБ спектроскопии исследованы коэффициенты упругости в структурах  $\text{CaF}_2/\text{Si}$  (Ш) при различной толщине слоев  $\text{CaF}_2$ . Обнаружено, что в пленках тоньше 150 нм коэффициенты упругости по величине оказываются меньше соответствующих значений, вычисленных с использованием коэффициентов упругости объемного материала слоя и подложки. Авторы этих работ связывают уменьшение коэффициентов упругости эпитаксиального слоя флюорита с наличием в нем дислокаций несоответствия, возникающих из-за различия постоянных решетки слоя и подложки. В работе [7] изучалась структура  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  (Ш), где помимо разнообразных упругих мод наблюдалось также влияние анизотропии упругих свойств подложки на величину скорости поверхностных акустических волн вдоль различных направлений в плоскости пленки.

В настоящей работе методом МБ спектроскопии исследуются структуры  $\text{CaF}_2/\text{Si}$  (Ш), причем кроме измерения соответствующих скоростей распространения ставилась задача изучения зависи-

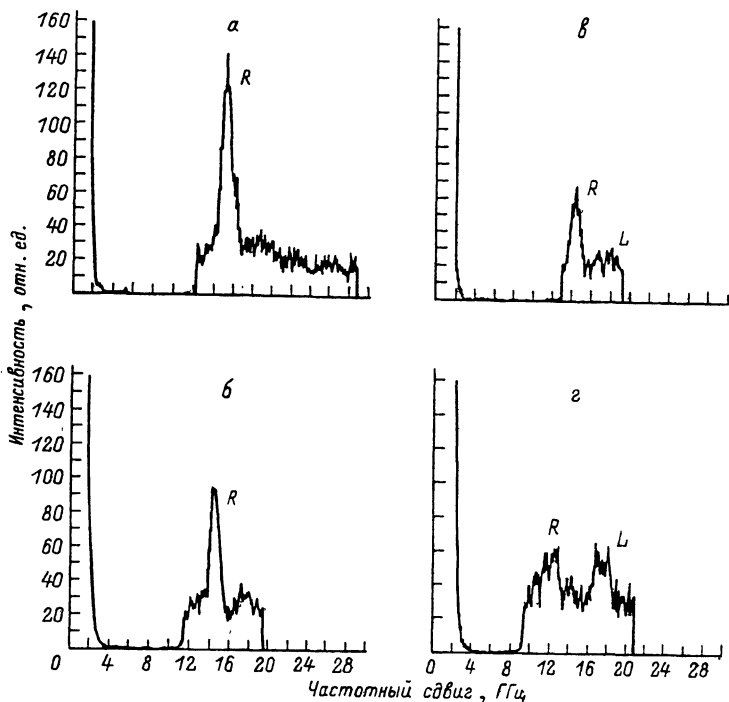
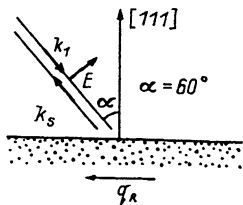


Рис. 1. Записи спектров МБ для образцов с естественной поверхностью  $Si(111)$  (а) и гетероструктуры  $CaF_2/Si(111)$  со слоем флюорита толщины  $h = 20$  нм (б), 30 нм (в), 100 нм (г). Электрический вектор  $E$  в падающей световой волне лежал в плоскости падения; рассеяние возбуждалось световой волной с  $\lambda = 514,5$  нм.  $U$  - несмещенная компонента МБ спектра. Наличие пьедестала у МБ компонент  $R, L$  связано с применением сегментирования при сканировании интерферометра Фабри-Перо по спектру.

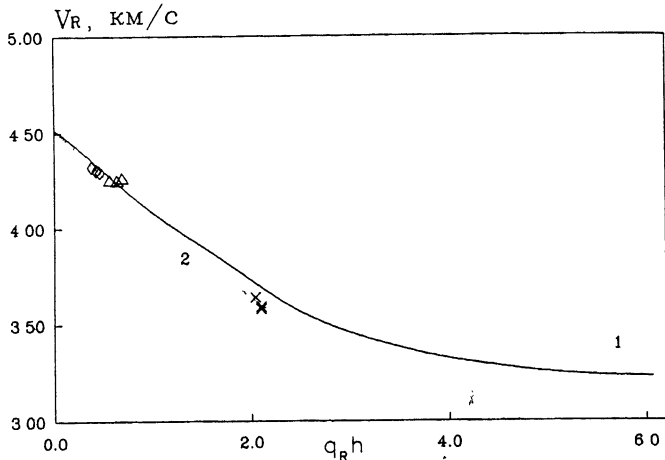


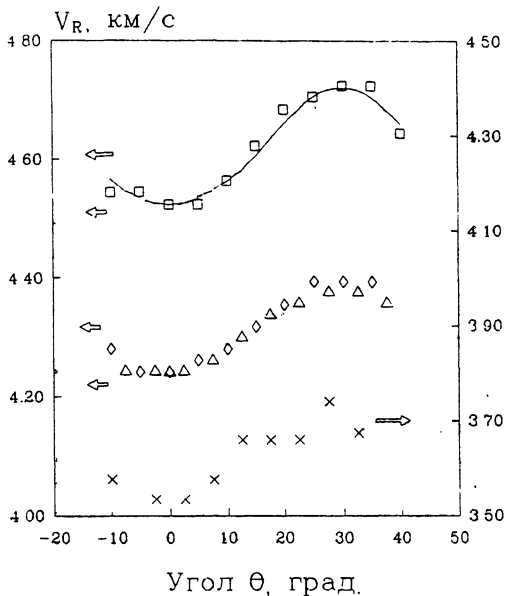
Рис. 2. Зависимость скоростей поверхностных акустических волн от  $q_R h$  — нормированной толщины слоя  $CaF_2$  для направления  $[110]$ ;  $h=20$  нм ( $\circ$ ), 30 нм ( $\Delta$ ), 100 нм ( $\times$ ). 1 — (сплошная линия) дисперсионная кривая, вычисленная с использованием коэффициента объемного материала слоя и подложки; 2 — (пунктир) дисперсионная кривая, вычисленная с использованием коэффициентов упругости объемного материала подложки и экспериментально определенных значений для слоя  $CaF_2$  толщиной 100 нм [5].

мости скорости упругих волн в плоскости пленки от анизотропных свойств подложки  $Si(111)$  в этой плоскости.

Эпитаксиальные слои  $CaF_2$  на  $Si(111)$  были выращены в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке исследовательского типа [8] при температурах подложки 500–700 °С. Скорость роста слоев составляла 2–3 нм/мин. Тяжи, наблюдаемые на картинах дифракции быстрых электронов на отражение во время роста, указывали на монокристаллический характер слоев  $CaF_2$ , а также на гладкость их поверхности в атомном масштабе.

Для последующего изучения спектров МБ рассеяния были выбраны три структуры с толщиной слоя  $CaF_2$   $h=20$ , 30 и 100 нм, выращенные при различных технологических условиях. Измерения, проведенные методом примесного люминесцентного зонда [2], показали, что величины упругих деформаций в плоскости слоя при комнатной температуре составляли +1.2%, -0.6% и +0.2% соответственно. Величина и знак деформации в структуре с  $h=30$  нм свидетельствовали об отсутствии в ней дислокаций несоответствия [2].

Спектральная часть работы выполнялась на кафедре физики кристаллов МГУ. Для получения спектров рассеянного света применялась спектральная установка с пятипроходным интерферометром



Угол  $\theta$ , град.

Рис. 3. Зависимость скоростей поверхностных акустических волн  $V_R$  в плоскости (111) от азимута  $\theta$  для образцов  $Si(111)$  ( $\square$ ) и гетероструктуры  $CaF_2/Si(111)$  со слоем флюорита толщины  $h=20$  нм ( $\diamond$ ), 30 нм ( $\triangle$ ), 100 нм ( $\times$ ). Сплошная линия — теоретическая кривая для поверхностной акустической волны релеевского типа, вычисленная с использованием объемных значений упругих постоянных кристалла  $Si$ . Шкала по оси ординат для образцов с  $h=20, 30$  нм приведена слева, а для образцов с  $h=100$  нм — справа.

Фабри-Перо фирмы *Burleigh* с пьезоэлектрическим сканированием по спектру и системой стабилизации и накопления данных. Источником света служил одночастотный аргоновый лазер *Spectra Physics* модели 165-03. Рассеяние возбуждалось светом с длиной волны 514.5 нм и мощностью  $\approx 50-100$  мВт. Свет, рассеянный образцами, наблюдался под углом  $180^\circ$  к падающему пучку. Область дисперсии составляла 56.0 Гц, коэффициент резкости при этом был  $\approx 60$ .

На рис. 1 приведены записи спектров МБ света, рассеянного естественной поверхностью  $Si(111)$  (рис. 1, а), а также структурой  $CaF_2/Si(111)$  при различной толщине пленки  $h$  (рис. 1, б-г). В верхней части рис. 1 представлена геометрия рассеяния света. Здесь:  $\alpha$  — угол падения света на образец,  $k_i, k_s, q_R$  — волновые векторы падающего и рассеянного света, а также поверхностной гиперзвуковой волны соответственно,  $R$  — компонента рассеянного света, соответствующая обобщенным поверхностным вол-

нам релейского типа,  $L$  - линия, соответствующая упругой волне, часть мощности которой перекачивается из пленки в подложку (волна утечки).

Из рисунка видно, что по мере увеличения  $h$  наблюдается смещение  $R$ -компоненты в сторону меньших частот. Следует также отметить значительное изменение характера спектра рассеянного света при  $h=100$  нм, когда интенсивности  $R$  и  $L$ -компонент оказались сравнимыми, и ширина  $R$ -линии заметно возросла, что, видимо, связано с изменением (по мере роста  $h$ ) доминирующего механизма поверхностного рассеяния света [6].

На рис. 2 приведены результаты измерений скорости поверхностных волн  $V_R$  для всех пленок вдоль направления [110]. Эти значения вычислялись по частотным сдвигам  $R$ -компонент. Кривая 1, также представленная на рис. 2, - результат расчета по теории упругости скорости поверхностной упругой волны для данной слоистой структуры. При этом использовались табличные значения коэффициентов упругости объемного материала слоя и подложки.

Из рисунка видно, что экспериментальные точки для образца с  $h=30$  нм, в котором отсутствуют дислокации несоответствия, достаточно хорошо ложатся на кривую 1. В то же время отклонение экспериментальных значений скоростей  $V_R$ , полученных в случае образцов с  $h=20$  и 100 нм, выходит за пределы погрешности измерений. Знак этих отклонений, как и в [5], для подобных структур с  $h=65$  и 100 нм соответствует уменьшению скорости  $V_R$ . Отметим, что полученные нами экспериментальные значения  $V_R$  для  $h=100$  нм хорошо ложатся на кривую 2 (показана пунктиром), построенную с использованием коэффициентов упругости, измеренных в работе [5] для структуры с такой же толщиной слоя флюорита.

В данной работе также проведено исследование влияния анизотропии упругих свойств подложки  $Si(111)$  на величину скорости  $V_R$  упругих поверхностных волн, распространяющихся в плоскости пленки в различных направлениях, характеризующихся углом  $\theta$ , отсчитываемым относительно кристаллографического направления [110]. На рис. 3 приведены результаты этого исследования для структуры  $CaF_2$  с  $h=20$  нм ( $\diamond$ ), 30 нм ( $\Delta$ ), 100 нм ( $\times$ ), а также для естественной поверхности  $Si(111)$  ( $\square$ ). Сплошная кривая на рис. 3 соответствует теоретической зависимости для  $Si(111)$ . Из рисунка видно, что экспериментальные точки для  $Si(111)$  хорошо ложатся на эту теоретическую кривую. Для всех направлений распространения поверхностных акустических волн в плоскости (111) значение скорости  $V_R$  заметно уменьшается с увеличением  $h$ . Следует также отметить, что как в образце  $Si(111)$ , так и во всех исследованных структурах наблюдается заметная анизотропия  $V_R$ , причем ее величина уменьшается с увеличением  $h$ , так что в структуре с  $h=100$  нм анизотропия  $V_R$  оказывается примерно в 2 раза меньше, чем в образце  $Si(111)$ . В настоящее время причина такого изменения анизотропии величины  $V_R$  представляется не вполне ясной. Следует выяснить,

связано ли оно с физическими причинами или с уменьшением точности в определении положения линии для структуры с  $h=100$  нм.

Таким образом, в настоящей работе исследованы спектры МБ рассеяния от гетероструктур – тонкий эпитаксиальный слой  $CaF_2$  (20–100 нм) – подложка  $Si(111)$ . По частотным сдвигам  $R$ -компонент МБ рассеяния определены скорости поверхностных акустических волн  $V_R$  гиперзвукового диапазона частот. В случае более совершенной структуры ( $h=30$  нм) можно отметить лучшее соответствие скорости поверхностных упругих волн ее значению, вычисленному с использованием коэффициентов упругости объемного материала пленки и подложки. Впервые исследована азимутальная зависимость  $V_R$  в плоскости (111). В структурах с тонкими слоями  $CaF_2$  (20–30 нм) величина анизотропии  $V_R$  оказалась близкой к наблюдавшейся для естественной поверхности  $Si$ . С увеличением толщины пленки как сама величина скорости, так и ее анизотропия существенно уменьшались.

Авторы благодарны Х.К. Альваресу и Н.Л. Яковлеву за выращивание образцов гетероструктур, а также И.А. Яковлеву и А.Б. Шерману за внимание к работе и поддержку.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Schowalter L.J., Fathauer R.W. // J. Vac. Sci. Technol. 1986. V. A4. P. 1026.
- [2] Соколов Н.С., Вихель Е., Гастев С.В., Новиков С.В., Яковлев Н.Л. // ФТТ. 1989. Т. 31. В. 2. С. 75.
- [3] Zanon R., Bell J.A., Stegeman G.I., Seaton C.T. // Thin Solid Films. 1987. V. 154. P. 225–237.
- [4] Nizzoli F., Sandercock J.R. In: Dynamical Properties of Solids. V. 6 / Ed. by G.H. Horton, A.A. Maradudin. North-Holland, Amsterdam, 1990. P. 281.
- [5] Karanikas J.M., Sooryakumar R., Phillips J.M. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 9. P. 3407–3410.
- [6] Karanikas J.M., Sooryakumar R., Phillips J.M. // Phys. Rev. 1989. V. E39. N 2. P. 1388.
- [7] Elmiger M.W., Henz J., Kanel H.V., Ospelt M., Wachter P. // Surface and Interface Anal. 1989. V. 14. P. 18–22.
- [8] Гастев С.В., Новиков С.В., Соколов Н.С., Яковлев Н.Л. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 16. С. 961.