

- [4] A. Radke, T. Gissibl, T. Klotzbächer, *Adv. Mat.* **23**, 3018 (2011).
- [5] K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 057402 (2011).
- [6] A. A. Maksimov, I. I. Tartakovskii, E. V. Filatov, *et al.*, *Phys. Rev. B* **89**, 045316 (2014).
- [7] S. V. Lobanov, T. Weiss, N. A. Gippius, *et al.*, *arXiv:1412.7490* [physics.optics].
- [8] L. Verslegers, P. B. Catrysse, Z. Yu, *et al.*, *Nano Letters* **9**, 235 (2009).
- [9] D. Lin, P. Fan, E. Hasman, M. L. Brongersma, *Science* **345**, 298 (2014).

ИК спектроскопия поверхностных фононных поляритонов как метод исследования оптических свойств ультратонких пленок

Е.А. Виноградов

Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

Для использования тонких пленок полупроводников в различных приложениях, в том числе и для оптоэлектроники, требуется знать их физические свойства. В большинстве случаев свойства пленок сильно отличаются от свойств объемных материалов, из которых они изготовлены. Для исследования физических (оптических) свойств сверхтонких (нанометровых) пленок до сих пор нет спектрометров с необходимой фотометрической точностью. В ряде случаев для определения физических параметров нанопленок полезно использовать спектроскопию поверхностных поляритонов.

Поверхностные поляритоны (ПП) являются нерадиационными электромагнитными возбуждениями на границе раздела двух сред, распространяющимися вдоль границы раздела, если диэлектрические проницаемости контактирующих веществ имеют разные знаки [1–4]. Поле ПП концентрируется непосредственно у границы раздела и экспоненциально убывает с расстоянием от интерфейса (ближнее поле), так что ПП очень чувствительны к характеристикам интерфейса. В силу этого спектроскопия ПП может быть уникальным источником информации о физических свойствах сверхтонких пленок на поверхности кристаллических подложек. Если частота оптических фононов пленки попадает в область существования ПП подложки, то, в силу резонанса между ними, возникает расщепление и сдвиг полос спектров поглощения ПП подложки. Из этих экспериментальных данных можно восстановить все константы диэлектрической проницаемости пленки и ее толщину, и тем самым характеризовать свойства пленки. Возникающая при этом щель в дисперсионных кривых ПП подложки пропорциональна корню квадратному из толщины пленки, что позволяет измерять толщину и очень тонких пленок [1,5–11].

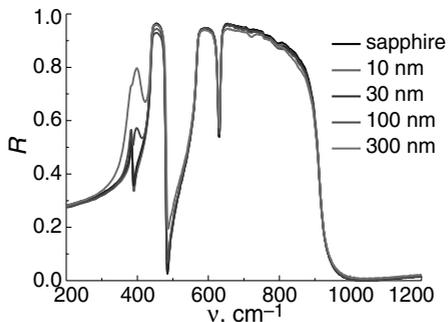


Рис. 1. Спектры отражения пленок MgO толщиной 10, 30, 100 и 300 нм на сапфире при нормальном падении в дальнем поле [5].

В докладе обсуждаются экспериментальные результаты по исследованию оптических свойств пленок MgO (толщиной 10, 30, 100 и 300 нм) [5,7,9,10] и пленок AlN (толщиной 40 и 400 нм) на сапфире [6–9]. Спектры ПП измерялись в режиме нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) на ИК-Фурье спектрометре IFS66v (Брукер), а спектры внешнего (в дальнем поле) отражения при углах близких к нормальному падению.

В спектрах отражения (рис. 1) пленки MgO толщиной 10 и 30 нм не видны, а пленки толщиной 100 и 300 нм проявляются только в низкочастотной области (вблизи 400 см^{-1}) благодаря резонансу ТО фонона пленки с низкочастотным ТО фононом сапфира.

На рис. 2 и 3 представлены спектры ближнего поля при различных углах внутри призмы НПВО для сапфира и сапфира с пленкой MgO толщиной 100 нм.

Высокочастотная полоса поглощения в спектрах НПВО сапфира обусловлена ПП границы раздела сапфир-вакуум. Зависимость частоты этой полосы от угла падения света в призме дает дисперсию ПП сапфира.

Как видно из рис. 3 пленка MgO радикально изменяет спектр ПП сапфира за счет резонанса ПП сапфира с оптическим фоном пленки MgO. Это взаимодействие приводит к расщеплению высокочастотной ветви ПП сапфира вблизи частоты 700 см^{-1} . Из угловой зависимости спектров отражения в режиме НПВО восстанавливалась дисперсия ПП сапфира с пленкой. Она сравнивалась с дисперсией ПП, рассчитанной с использованием параметров диэлектрической проницаемости сапфира (найденными из дисперсионного анализа спектров внешнего отражения) при подгонке параметров диэлектрической проницаемости пленки, которые определялись лучшим совпадением рассчитанной дисперсии ПП с экспериментальными частотно-угловыми

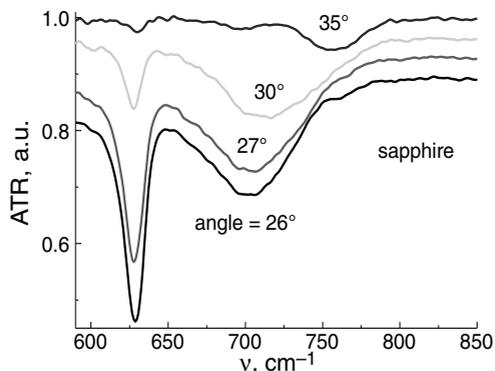


Рис. 2. Спектры НПВО сапфира для четырех углов падения света в призме KRS-5. (Спектры сдвинуты вдоль оси y , чтобы избежать их перекрытия).

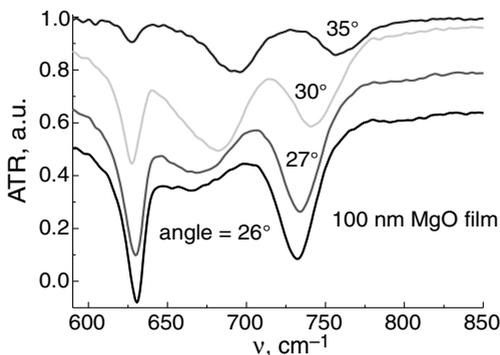


Рис. 3. Спектры НПВО пленки MgO толщиной 100 нм на сапфире для четырех углов падения света в призме KRS-5. (Спектры сдвинуты вдоль оси y , чтобы избежать их перекрытия).

спектрами. На рис. 4 представлены дисперсионные кривые ПП пленки MgO толщиной 10 нм на сапфире, которую в спектрах дальнего поля было не видно совсем.

Удивительно, результаты исследований показали, что оптические константы пленок MgO толщиной 10 и 300 нм оказались очень близкими к таковым для объемного MgO, в отличие от пленок толщиной 30 и 100 нм.

Итак, на примере пленок MgO на сапфире показано, что благодаря резонансу ПП сапфировой подложки с оптическими фонами даже очень тонких (нанометровых) пленок, возможно восстановить дисперсионные кривые поверхностных (интерфейсных) поляритонов и измерить расщепление ПП под-

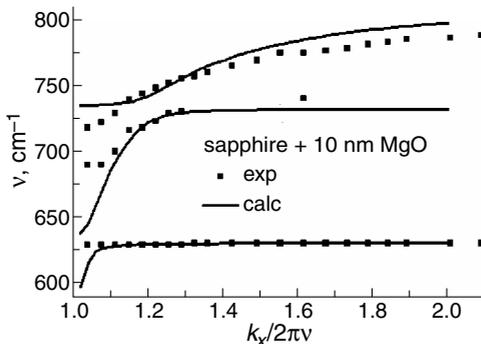


Рис. 4. Дисперсия поверхностных поляритонов структуры «пленка MgO толщиной 10 нм на сапфире». Сплошные кривые вычислены с использованием оптических констант массивного MgO [5] и сапфира.

ложки. Подтверждено, что это расщепление пропорционально корню квадратному из толщины пленки. А в результате подгонки расчетных дисперсионных кривых к экспериментальным, варьируя константы диэлектрических проницаемостей пленки, можно определить не только все эти константы, но и получить сведения об изменении оптических констант материала подложки на нанометровых толщинах [5-10].

Литература

- [1] G. N. Zhizhin, M. A. Moskaleva, E. A. Vinogradov, *et al.*, *Appl. Spectr. Rev.*, **18**(2), 171 (1982–1983).
- [2] Е. А. Виноградов, И. А. Дорофеев. *Термостимулированные электромагнитные поля твердых тел*, Физматлит 2010. 484 с.
- [3] I. A. Dorofeyev, E. A. Vinogradov. *Physics Reports* **504**, 75 (2011), doi: 10.1016/j.physrep.2011.03.004
- [4] I. A. Dorofeyev, E. A. Vinogradov, *Int. Review of Physics*, **6**, 202 (2012).
- [5] V. A. Yakovlev, N. N. Novikova, E. A. Vinogradov, *et al.*, *J. of Nanoparticle Research*, **13**(11), 5841 (2011).
- [6] V. A. Yakovlev, N. N. Novikova, E. A. Vinogradov, *et al.*, *Phys. Lett. A* **373**, 2382 (2009).
- [7] Е. А. Виноградов, Н. Н. Новикова, В. А. Яковлев. Доклад на научной сессии ОФН РАН 23 октября 2013 г. УФН **184**, 653, (2014).
- [8] N. N. Novikova, E. A. Vinogradov, V. A. Yakovlev, *et al.*, *Surface & Coatings Technology* **227**, 58 (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.02.037>
- [9] N. N. Novikova, V. A. Yakovlev, E. A. Vinogradov, *et al.*, *Applied Surface Science* **267**, 93 (2013). DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.07.157.
- [10] S. Y. Pung, K. L. Choy, E. A. Vinogradov, *et al.*, *J. of Crystal Growth* **312**, 2220 (2010). DOI:10.1016/j.jcrysgro.2010.04.050