

02 Резонанс фона на тонкой пленке с поверхностным поляритонем подложки

© В.А. Яковлев, Н.Н. Новикова, С.А. Климин*

Институт спектроскопии РАН,
Троицк, Москва, Россия

*e-mail: klimin@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 07.06.2024 г.

В окончательной редакции 07.06.2024 г.

Принята к публикации 29.07.2024 г.

В слоистых структурах оптические эффекты, как правило, линейны по толщине пленки (при малых толщинах). Поэтому теоретически предсказанная В.М. Аграновичем корневая зависимость расщепления поверхностного поляритона (ПП) от толщины уникальна. В настоящей работе продемонстрировано расщепление кривой дисперсии ПП сапфира после нанесения на его поверхность пленки оксида магния. Величина этого расщепления прямо пропорциональна квадратному корню из толщины переходного слоя, как было предсказано теорией. Проведен обзор других экспериментов, подтверждающих теоретические выводы.

Ключевые слова: поверхностные поляритоны, спектроскопия НПВО, тонкие пленки, дисперсионный анализ, кривые дисперсии, оксид магния, сапфир.

DOI: 10.61011/OS.2024.08.59023.6792-24

1. Введение

В настоящей работе речь пойдет об экспериментальном подтверждении теоретически предсказанного расщепления поверхностного поляритона (ПП) подложки в присутствии переходного слоя нанометровой толщины. Эффект был предсказан в 1974 г. в работе В.М. Аграновича и А.Г. Мальшукова „Поверхностные поляритоны при резонансе с колебаниями переходного слоя“ [1]. В дальнейшем В.М. Агранович опубликовал обзор [2], посвященный кристаллооптике ПП и свойствам поверхности. На рис. 1, *a* [2] показано, что в спектральном интервале между поперечной (Ω_{\perp}) и продольной (Ω_{\parallel}) частотами фона кристалла есть область существования ПП. Рисунок 1, *b* показывает, что в случае, когда на поверхности кристалла находится переходный слой, то при резонансе частоты колебания переходного слоя (ω_0) с частотой поляритона ПП расщепляется (рис. 1, *b*). В [1] было показано, что величина расщепления прямо пропорциональна квадратному корню из толщины переходного слоя. Это дает возможность экспериментаторам изучать оптические свойства тонкопленочных покрытий даже нанометрового диапазона с использованием спектроскопии ПП.

В последние десятилетия пленки нанометровой толщины широко применяются на практике в микро- и оптоэлектронике. Как правило, чтобы обеспечить достаточную прочность и долговечность, функциональные тонкие пленки наносятся на подложку. Вследствие несогласования параметров кристаллических решеток двух материалов свойства пленок на подложках могут сильно отличаться от свойств объемных материалов, из которых они изготовлены, что, безусловно, требует изучения их

свойств для обработки технологий создания покрытий с наперед заданными свойствами. Однако существующие традиционные оптико-спектральные методы с использованием спектров отражения и пропускания недостаточно чувствительны к сверхтонким пленкам, так как из-за их малой оптической плотности пленки в инфракрасных (ИК) спектрах пропускания и отражения на фоне спектров подложек просто не видны. В этом случае для определения физических параметров нанопленок хорошие результаты дает спектроскопия ПП, развитая выдающимся физиком В.М. Аграновичем.

ПП — это волны, распространяющиеся вдоль границы раздела сред, при условии, что диэлектрические проницаемости контактирующих сред имеют разные знаки. Поле этих волн максимально у границы раздела и экспоненциально убывает с расстоянием [3,4] при удалении от нее (рис. 2, *a*). Использование такого (ближнего) поля является преимуществом спектроскопии ПП в сравнении с традиционными методами изучения наноразмерных объектов.

В [5–7] теоретическое предсказание работы [1] было экспериментально подтверждено. При помощи спектроскопии ПП наблюдался резонанс продольного фона переходного слоя (пленки) LiF с ПП подложки Al_2O_3 (сапфира). В спектрах наблюдалось расщепление кривой дисперсии ПП. Величина расщепления следовала корневой зависимости от толщины пленки. Позднее экспериментальные доказательства предсказаний работы [1] были получены и для других систем пленка/подложка [8–17]. Расщепление ПП наблюдалось также и на переходных слоях, возникающих вследствие модификации поверхности кристалла [18,19].

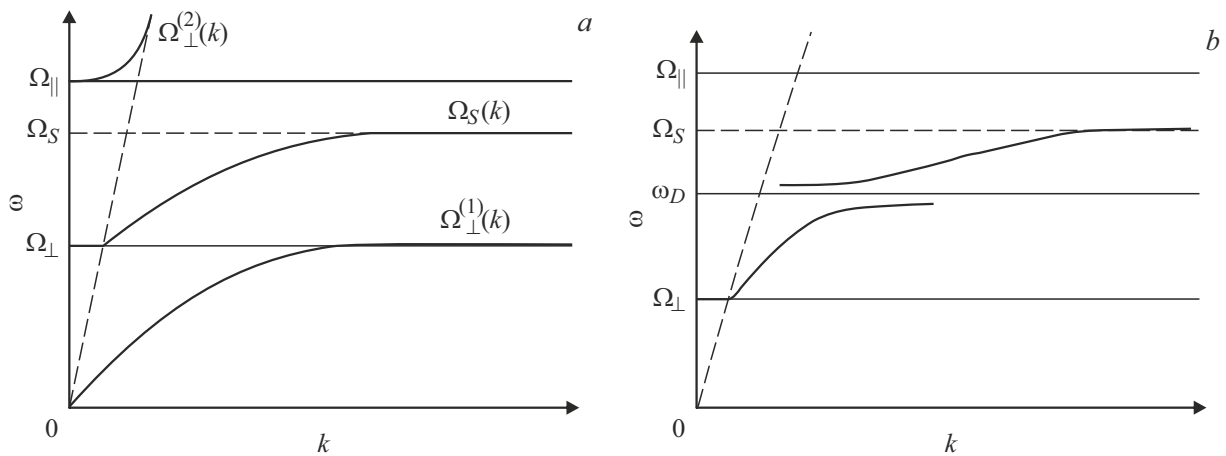


Рис. 1. (а) Дисперсия поляритонов для плоской границы раздела сред. (б) Дисперсия поляритонов при наличии резонанса с колебаниями переходного слоя. Рисунки взяты из работы В.М. Аграновича [2].

В настоящей работе мы остановились подробно на исследовании тонкопленочных покрытий MgO, выращенных на подложках из сапфира. Сравнены результаты исследования „традиционным“ методом спектроскопии „внешнего“ отражения и методом спектроскопии НПВО. Показано, что фонon MgO, частота продольных колебаний которого попадает в резонанс с ПП сапфира, расщепляет кривую дисперсии последнего. Показано, что расщепление ПП подложки пропорционально корню квадратному из толщины пленки, как было предсказано в работе [1]. В заключение сравниваются имеющиеся в литературе экспериментальные данные для различных случаев резонанса.

2. Детали эксперимента

В эксперименте были исследованы четыре образца, представляющие собой тонкие пленки MgO на плоскости (0001) монокристаллического сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) толщиной около 1 μm . Пленки были получены методом химического осаждения из газовой фазы [20] в Институте неорганической химии и поверхности в Падуе, Италия. Толщина пленок MgO составляла 300, 100, 30 и 10 nm.

Измерения ИК спектров отражения и НПВО проводились на фурье-спектрометре фирмы „Bruker“ IFS 66 v/s при комнатной температуре в широком спектральном диапазоне от 450 до 5000 cm^{-1} . Внешнее отражение было исследовано при падении излучения, близком к нормальному. Спектры НПВО в средней ИК области с разрешением 4 cm^{-1} в *p*-поляризованном свете измерялись в геометрии Отто [21] (рис. 2, б) с использованием призмы из KRS-5 с изменением угла падения света θ в диапазоне от 26° до 63°, т.е. при углах больше критического угла полного внутреннего отражения (25°), определяемого условием через коэффициент преломления $\text{KRS-5} \sin \vartheta_{\text{cr}} = 1/n_{\text{KRS-5}}$.

Спектры НПВО очень чувствительны к толщине зазора между образцом и призмой, поскольку призма возмущает поле ПП. Для корректного измерения частоты и ширины полосы поглощения ПП при разных углах падения света в призме подбиралась такая величина зазора, при которой интенсивность измеряемой полосы была на уровне нескольких процентов. В этом случае возмущение ПП призмой невелико. Воздушный зазор между призмой и образцом изменялся от нескольких микрон до десятков микрон с помощью лавсановых прокладок. Измерялась частотно-угловая зависимость ПП. Из угловой зависимости спектров отражения в режиме НПВО построены кривые дисперсии ПП.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Спектры внешнего отражения пленок MgO на сапфире

На рис. 3, б, с представлены спектры внешнего ИК отражения для пленок MgO толщиной 10, 30, 100, 300 nm на подложках сапфира, а также (для сравнения) спектр подложки. Спектры отражения для двух образцов с самыми тонкими пленками практически повторяют спектр отражения подложки. В то же время на образцах с пленками толщиной 100 и 300 nm видны изменения в низкочастотной области вблизи 400 cm^{-1} .

ИК активные фононы сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) хорошо изучены [23–25]. Полученные нами спектры отражения для подложки с ориентацией (0001) находятся в согласии с имеющимися литературными данными. Кристалл Al_2O_3 одноосный и кристаллизуется в тригональной сингонии, пространственная группа $R3c$ [26,27]. В спектре на рис. 2, б наблюдаются (в соответствии с правилами отбора) четыре фонона симметрии E_u . Мы провели расчет диэлектрической проницаемости сапфира методом дисперсионного анализа спектра отражения с использованием программ SCOUT [28,29] и RefFIT [30].

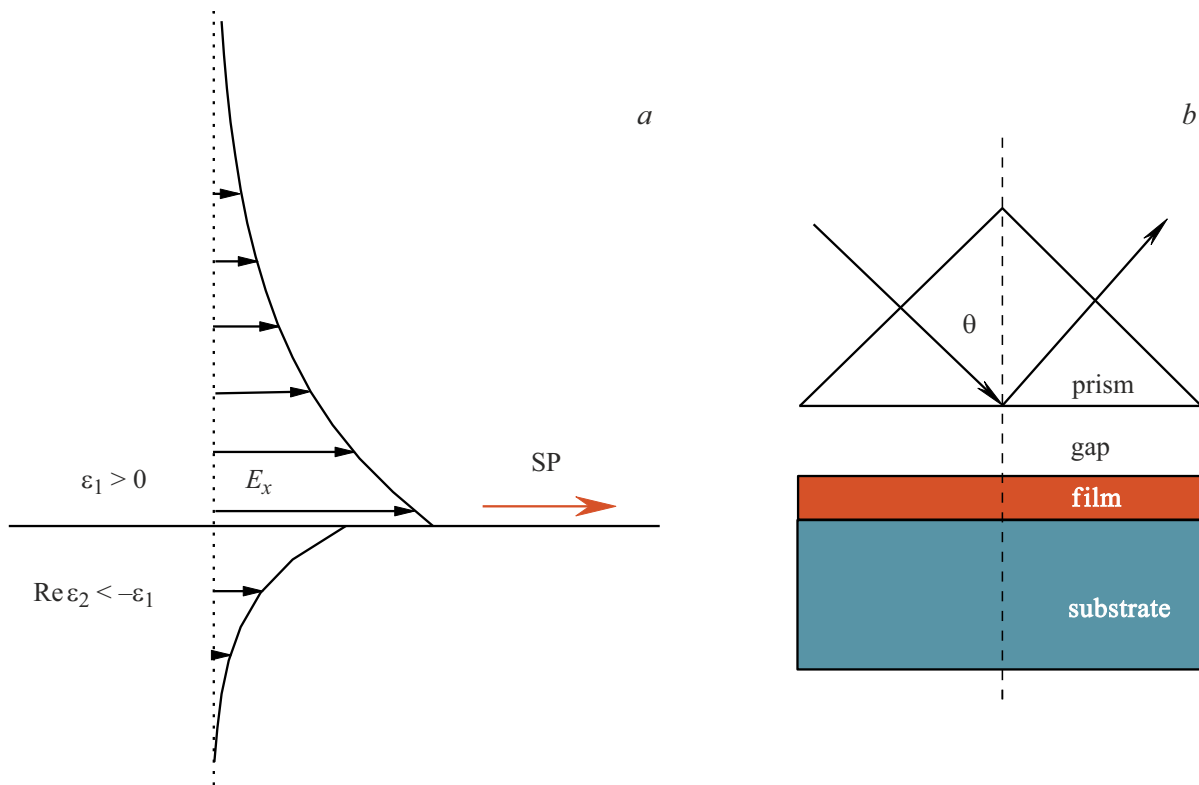


Рис. 2. (а) Схематическое изображение электромагнитного поля ПП (SP) и условие его возбуждения. (б) Возбуждение ПП в геометрии Отто.

Параметры ИК активных колебательных мод симметрии E_u подложки Al_2O_3 : частоты поперечных и продольных колебаний ν_{TO} и ν_{LO} , силы осциллятора $\Delta\epsilon$ и константы затухания γ . $\epsilon_\infty = 3.15$

| Обозначение | $\nu_{\text{TO}}, \text{cm}^{-1}$ | $\nu_{\text{LO}}, \text{cm}^{-1}$ | $\Delta\epsilon$ | γ, cm^{-1} |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------------------|
| E_u^1 | 384.8 | 387 | 0.27 | 4.9 |
| E_u^2 | 440 | 483 | 3.01 | 2.2 |
| E_u^3 | 565.4 | 908 | 3.21 | 19 |
| E_u^4 | 633 | 629 | 0.13 | 4.8 |

Коэффициент отражения $R(\nu)$ вычислялся по формулам Френеля для отражения света от слоистых структур. Комплексная диэлектрическая проницаемость ϵ была выражена через сумму вкладов N (четырёх для сапфира) затухающих осцилляторов:

$$\epsilon(\nu) = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = \epsilon_\infty + \sum_{j=1}^N \Delta\epsilon_j \frac{\nu_{\text{TO}j}^2}{\nu_{\text{TO}j}^2 - \nu^2 + i\gamma_j\nu}. \quad (1)$$

Здесь $\nu_{\text{TO}j}$, $\Delta\epsilon_j$ и γ_j — соответственно частота поперечных колебаний (ТО), сила осциллятора и затухание j -го фонона; ϵ_∞ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость, ϵ_1 и ϵ_2 — действительная и мнимая части ϵ .

Оптические параметры, полученные в результате подгонки спектра отражения сапфира, приведены в таблице. Фонон E_u^4 является инвертированным [31–37]. Это слабый фонон, частота которого попала внутрь ТО–ЛО-расщепления мощного фонона E_u^3 . Его ТО- и ЛО-частоты инвертированы: $\nu_{\text{TO}} > \nu_{\text{LO}}$. На спектре отражения он выглядит как линия поглощения в области сильного отражения (область остаточных лучей).

Полученная зависимость $\epsilon_1(\nu)$ приведена на рис. 3, а. Область отрицательных значений ϵ_1 обозначена серой полосой в верхней части рисунка. Эта область начинается чуть выше ТО-частоты $\nu_{\text{TO}} = 565 \text{ cm}^{-1}$ мощного фонона E_u^3 и простирается почти до его ЛО-частоты. Наличие широкой спектральной области с $\epsilon_1 < -1$ делает сапфир удобным материалом для спектроскопии ПП.

Колебательные свойства оксида магния MgO также хорошо изучены [38–41]. Кристалл имеет кубическую симметрию, пр. гр. $Fm\bar{3}m$ [42]. В ИК спектрах активен один фонон. Его поперечная частота составляет $\nu_{\text{TO}} = 418 \text{ cm}^{-1}$ [41]. Именно вблизи ТО-частоты фонона MgO появляются особенности в спектрах отражения для пленок толщиной 100 и 300 нм.

Продольная частота ИК активного фонона MgO составляет $\nu_{\text{LO}} = 738 \text{ cm}^{-1}$ [41] и попадает в область ПП сапфира. Реализуется схема, представленная на рис. 1, б. Таким образом, изучение спектров ПП

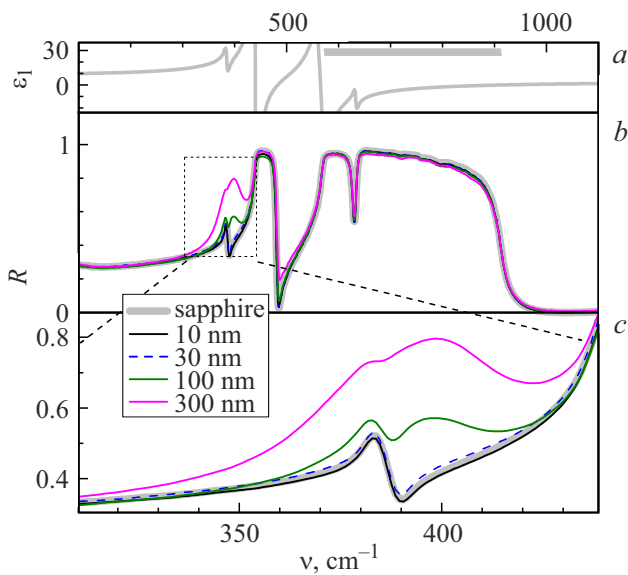


Рис. 3. (a) Действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ_1 сапфира. Серая полоса соответствует области отрицательных значений ϵ_1 . (b, c) Спектры отражения тонких пленок MgO толщиной 10, 30, 100 и 300 нм на подложках в сравнении со спектром подложки из сапфира.

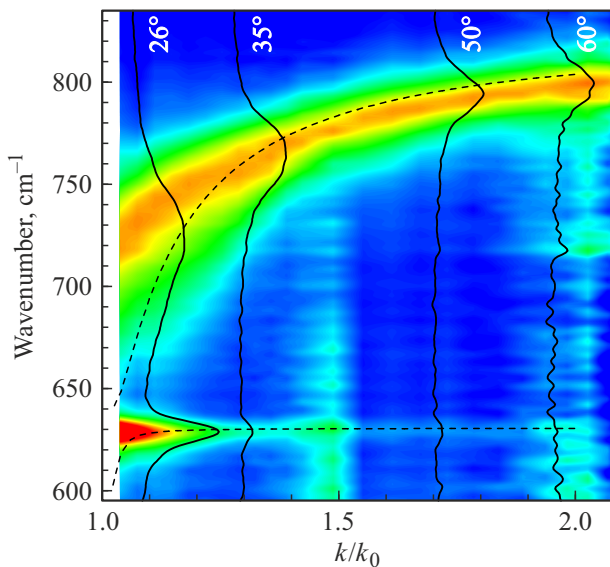


Рис. 4. Цветовая карта интенсивностей спектров НПВО сапфира в координатах частота - приведенный волновой вектор. Показаны четыре спектра для различных углов падения света (черные линии). Данные расчета - штриховые линии.

пленок MgO/сапфир представляет большой интерес для проверки выводов работы [1].

3.2. Дисперсия ПП на сапфире

На рис. 4 приведена цветовая карта интенсивностей спектров НПВО подложки сапфира в координатах частота - волновой вектор. Мы используем приведенный

волновой вектор (k/k_0), где k_0 — это волновой вектор при критическом угле НПВО (25°). На рисунке приведены также четыре спектра при выбранных волновых векторах. В спектрах НПВО наблюдаются два пика. Один из пиков находится на частоте вблизи 630 cm^{-1} . Частота этого пика практически не меняется при изменении волнового вектора, а его интенсивность заметно падает для больших значений k . Этот пик поглощения соответствует ПП, обусловленному связанным состоянием фотона и фонона E_u^4 . Смещение соответствующего пика в зависимости от k происходит в пределах его же ТО-ЛО-расщепления, а оно невелико и составляет всего лишь 4 cm^{-1} .

Второй пик в спектрах НПВО на рис. 4 сильно смещается (от 725 до 790 cm^{-1}) при изменении k . Этот пик соответствует ПП, обусловленному связанным состоянием фотона и фонона E_u^3 . Для этого ПП наблюдается сильная дисперсия (оранжевая кривая на карте интенсивностей рис. 4), частота ПП находится между ТО- и ЛО-частотами фонона E_u^3 .

Для сравнения на рис. 4 приведены также данные расчета дисперсионной ветви ПП, проведенного нами по методике, описанной в работах [15,43]. Наблюдается хорошее качественное согласие между экспериментом и расчетом. При малых k растет рассогласование данных. Оно связано с тем, что два ПП взаимодействуют друг с другом, в результате чего происходит как перекачка интенсивности между пиками, так и расталкивание квазичастиц.

3.3. Спектроскопия НПВО пленок MgO нанометровой толщины

На рис. 5 представлены карты интенсивностей и спектры НПВО для пленок MgO толщиной 300, 100, 30 и 10 нм на сапфире. В случае пленок толщиной 300 и 100 нм в спектрах НПВО для большинства волновых чисел присутствуют три пика, а не два, как это было в случае сапфира. Это говорит о том, что дисперсионная ветвь ПП сапфира расщепилась. Как следствие, наблюдаются две дисперсионные ветви ПП. Минимальное расстояние для разных k между этими ветвями мы называем расщеплением Δ (рис. 5, a). Для пленки 300 нм расщепление больше, оно составляет 105 cm^{-1} , для пленки толщиной 100 нм оно равно 62 cm^{-1} . На рис. 6, a приведены спектры НПВО всех образцов с пленками разной толщины при угле падения 26° . Видно, что расщепление линии вблизи 720 cm^{-1} существенно растет с увеличением толщины пленки MgO. Для пленки 10 нм наблюдается лишь слабое плечо с низкочастотной стороны линии. В спектре НПВО пленки 30 нм явно видно расщепление линии 720 cm^{-1} . Для пленки 100 нм расщепленные линии находятся на заметном расстоянии, в случае пленки 300 нм расщепление настолько велико, что низкочастотная компонента пересекает линию 620 cm^{-1} . Как видно на рис. 5, a, при малых углах

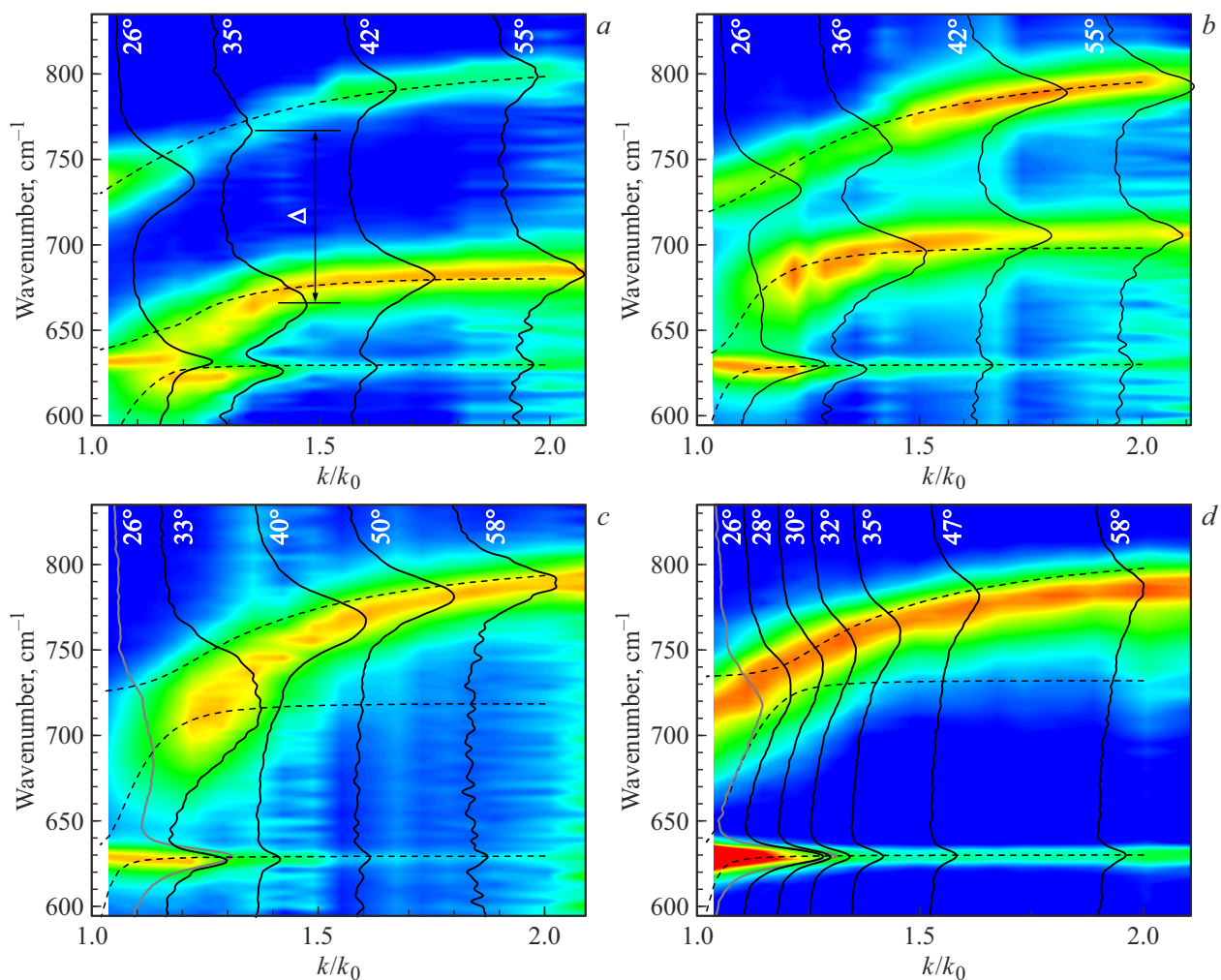


Рис. 5. Цветовые карты интенсивностей спектров НПВО пленок MgO на подложках сапфира в координатах частота — приведенный волновой вектор. Толщина пленки MgO составляет (a) 300 nm, (b) 100 nm, (c) 30 nm и (d) 10 nm. Показаны спектры для различных углов падения света (черные сплошные линии). Данные расчета — штриховые линии.

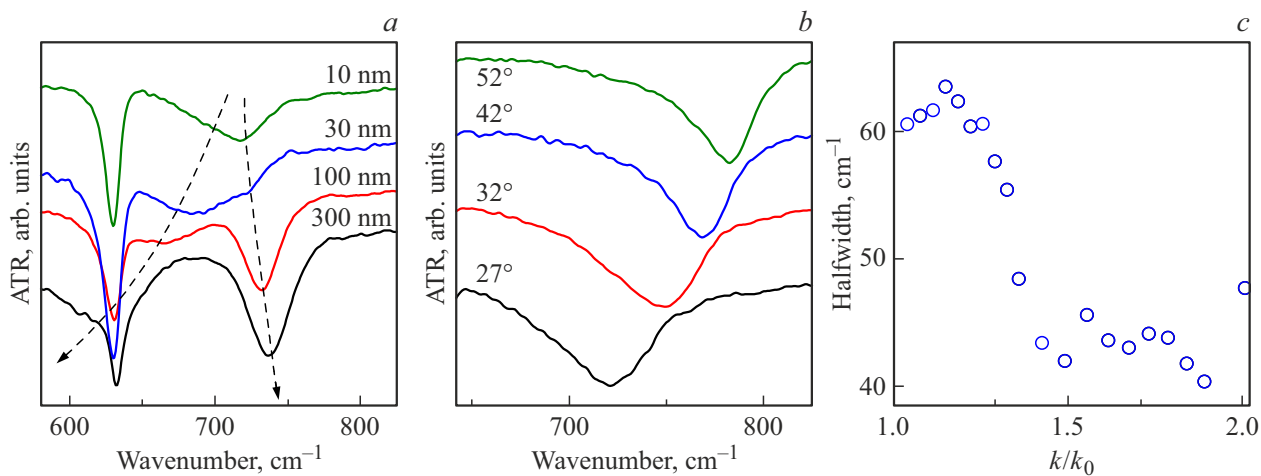


Рис. 6. (a) Спектры НПВО пленок MgO различной толщины на сапфире для угла падения 26° . (b) Спектры НПВО пленки MgO толщиной 10 nm на сапфире при различных углах падения. (c) Ширина на половине высоты линии поглощения в спектрах НПВО пленки MgO 10 nm для линии, показанной на рис. b, в зависимости от волнового вектора.

падения происходит дальнейшее взаимодействие двух ПП вблизи частоты 620 cm^{-1} .

Для пленок MgO толщиной 30 и 10 nm карты интенсивностей на рис. 5 не дают четкой картины расщепления. Это обусловлено малой толщиной и, как следствие, слабой интенсивностью ПП, обусловленного взаимодействием света с фоном оксида магния. При сближении частот двух ПП в зависимости от k происходит их резонансное взаимодействие и, как следствие, перекачка интенсивностей. В результате, как уже упоминалось выше, в спектрах НПВО пленки 30 nm при углах в диапазоне $26^\circ\text{--}33^\circ$ линия поглощения при $670\text{--}750\text{ cm}^{-1}$ состоит из двух близко расположенных компонент (см. также рис. 6, *a*). Это позволяет оценить величину расщепления Δ , которая по нашим данным составляет $30 \pm 5\text{ cm}^{-1}$. Для пленки толщиной 10 nm наблюдаются лишь слабые „плечики“ вблизи основной линии, которые позволяют также сделать вывод о расщеплении поляритонной ветви. На рис. 6, *b* показано, как смещается линия в спектре НПВО образца с пленкой 30 nm при различных значениях k . Кроме смещения наблюдается также изменение ширины линии. На рис. 6, *c* приведена зависимость ширины этой линии на половине высоты в зависимости от k . Наблюдается заметный рост ширины при малых k . Мы относим данный рост к эффекту расщепления ПП сапфира. Оценка величины Δ для пленки 10 nm по разнице полуширины вблизи и вдали от резонанса дает значение $17 \pm 3\text{ cm}^{-1}$.

На рис. 5 для всех образцов штриховыми линиями показаны результаты расчета кривых дисперсии ПП по формулам [15]. Наблюдается хорошее качественное согласие рассчитанных и экспериментальных зависимостей. Приведенные в этом разделе экспериментальные результаты показывают, что спектроскопия ПП, действительно, может давать хорошие результаты для исследования тонких пленок, вплоть до толщин порядка десяти нанометров.

3.4. Зависимость величины расщепления от толщины пленки

Полученные в предыдущем разделе значения для величин Δ для пленок различной толщины представлены на рис. 7 синими кружками. По оси ординат выбрана величина корня квадратного от толщины пленки d , так как в этом случае ожидается, что на графике экспериментальные точки должны лежать на прямой, выходящей из начала координат. Такого же цвета штриховая линия — это линейная подгонка функцией $\Delta = \alpha x$, где $x = \sqrt{d}$, α — коэффициент пропорциональности. Синие кружки хорошо ложатся на линейную зависимость. Это подтверждает вывод работы [1] о том, что расщепление дисперсионной ветви ПП при условии резонанса с фоном переходного слоя пропорционально квадратному корню от толщины переходного слоя.

На рис. 7 представлены аналогичные зависимости для различных комбинаций пленка/подложка [6,14,15,19]. Во

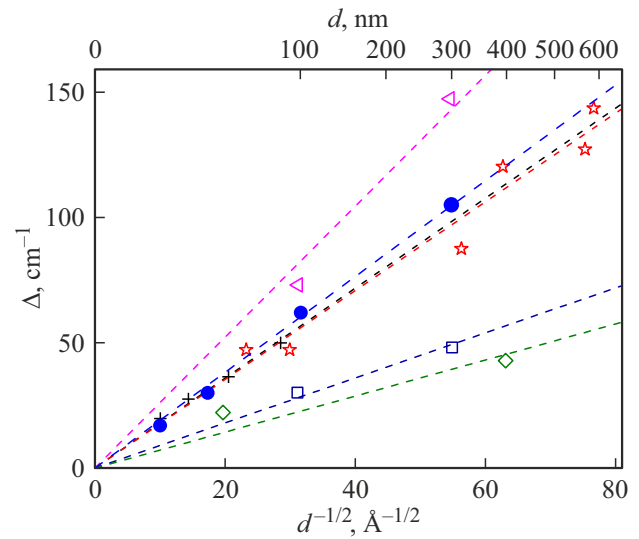


Рис. 7. Зависимость расщепления кривой дисперсии ПП от квадратного корня от толщины d пленок для различных сочетаний пленка/подложка: LiF/сапфир (крестики) [6], MgO/сапфир (кружки) [настоящая работа], LiF/MgO (звездочки) [15], ZnO/CaF₂ (треугольники) [19], ZnO/LiF (квадраты) [19], AlN/сапфир (ромбы) [14]. Штриховые линии — линейная аппроксимация для каждой пары пленка/подложка.

всех случаях наблюдалось расщепление дисперсионной ветви ПП. В спектрах НПВО расщепление было обнаружено уже для пленок толщиной около 10 nm, наиболее заметное расщепление наблюдалось для пленок толщиной 27 nm. В этом случае глубина обоих минимумов значительна только вблизи резонанса, при удалении от резонанса спектр приближается по своему виду к спектру без пленки, а интенсивность линии быстро уменьшается аналогично результатам, представленным в настоящей работе. Совокупность представленных данных однозначно подтверждает выводы работы [1].

4. Заключение

Представлены экспериментальные результаты исследования расщепления дисперсионной кривой ПП подложки за счет резонанса с фоном переходного слоя на примере пленок MgO на поверхности сапфира. Подтверждены выводы теоретической работы В.М. Аграновича и А.Г. Мальшукова [1], заложившей основу для использования спектроскопии ПП как метода исследования тонких пленок. В частности, показано, что экспериментальные расщепления в согласии с теорией пропорциональны квадратному корню из толщины пленки, т.е. уменьшаются не так быстро с уменьшением толщины. Эффект уверенно детектируется на пленках толщиной $\sim 30\text{ nm}$. Он также проявляется на пленках толщиной $\sim 10\text{ nm}$, но значительно слабее.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания № FFUU-2022-0003. Авторы благодарят коллег из Института неорганической химии и поверхности (г. Падуа, Италия) за предоставленные образцы нанопленок MgO на сапфире.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.M. Agranovich, A.G. Malshukov. *Opt. Commun.*, **11** (2), 169 (1974). DOI: 10.1016/0030-4018(74)90211-9
- [2] В.М. Агранович. *УФН*, **115** (2), 199 (1975). DOI: 10.3367/UFNR.0115.197502b.0199.
- [3] *Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред*, под ред. В.М. Аграновича, Д.Л. Миллса (Наука, М., 1985).
- [4] I.A. Dorofeyev, E.A. Vinogradov. *Phys. Rep.*, **504**, 75 (2011). DOI: 10.1016/j.physrep.2011.03.004
- [5] Г.Н. Жижин, О.И. Капуста, М.А. Москалева, В.Г. Назин, В.А. Яковлев. *УФН*, **117** (11), 573 (1975). DOI: 10.3367/UFNR.0117.197511j.0573 [G.N. Zhizhin, O.I. Kapusta, M.A. Moskalova, V.G. Nazin, V.A. Yakovlev. *Sov. Phys. Usp.*, **18**, 927–928 (1975). DOI: 10.1070/PU1975v018n11ABEH005241].
- [6] V.A. Yakovlev, V.G. Nazin, G.N. Zhizhin. *Opt. Commun.*, **15** (2), 293 (1975). DOI: 10.1016/0030-4018(75)90306-5
- [7] Г.Н. Жижин, М.А. Москалева, В.Г. Назин, В.А. Яковлев. *ЖЭТФ*, **72**, 687 (1977).
- [8] V.A. Yakovlev, N.N. Novikova, E.A. Vinogradov, S.S. Ng, Z. Hassan, H. Abu Hassan. *Phys. Lett. A*, **373**, 2382 (2009). DOI: 10.1016/j.physleta.2009.04.051
- [9] V.A. Yakovlev, N.N. Novikova, E.A. Vinogradov, S.S. Ng, Z. Hassan, H. Abu Hassan. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **210** (1), 012027 (2010). DOI: 10.1088/1742-6596/210/1/012027
- [10] V.A. Yakovlev, N.N. Novikova, E.A. Vinogradov, G. Rossetto, A. Sartori, M. Bolzan. *J. Nanoparticle Research*, **13** (11), 5841 (2011). DOI: 10.1007/s11051-011-0280-8
- [11] Н.Н. Новикова, Е.Д. Ольшанский, А.А. Теплов, Д.С. Шайтура, В.А. Яковлев. *ФТТ*, **54** (3), 536 (2012). [N.N. Novikova, E. Ol'shanskii, A.A. Teplov, D.C. Shaitura, V.A. Yakovlev. *Phys. Sol. St.*, **54** (3), 573 (2012). DOI: 10.1134/S1063783412100332].
- [12] N.N. Novikova, E.A. Vinogradov, V.A. Yakovlev, T.V. Malin, V.G. Mansurov, K.S. Zhuravlev. *Surface and Coating Technology*, **227**, 58 (2013). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.02.037
- [13] Е.А. Виноградов, Н.Н. Новикова, В.А. Яковлев. *УФН*, **184** (6), 653 (2014). DOI: 10.3367/UFNR.0184.201406g.0653 [E.A. Vinogradov, N.N. Novikova, V.A. Yakovlev. *Phys. Usp.*, **57** (6), 604b (2014). DOI: 10.3367/UFNe.0184.201406g.0653].
- [14] N.N. Novikova, E.A. Vinogradov, V.A. Yakovlev, T.V. Malin, V.G. Mansurov, K.S. Zhuravlev. *PSS(c)*, **12** (4–5), 439 (2015). DOI: 10.1002/pssc.201400177
- [15] G.N. Zhizhin, E.A. Vinogradov, M.A. Moskalova, V.A. Yakovlev. *Appl. Spectrosc. Rev.*, **18** (2), 171 (1983). DOI: 10.1080/05704928208055768
- [16] Д.С. Милахин, Т.В. Малин, В.Г. Мансуров, А.С. Кожухов, Н.Н. Новикова, В.А. Яковлев, К.С. Журавлев. *ФТП*, **56** (8), 734 (2022). DOI: 10.61011/OS.2024.08.59023.6792-24
- [17] V.A. Yakovlev, N.N. Novikova, E.A. Vinogradov, G. Rossetto, A. Sartori, M. Bolzan. *J. Nanopart. Res.*, **13** (11), 5841 (2011). DOI: 10.1007/s11051-011-0280-8
- [18] S.S. Ng, S.C. Lee, S.K. Mohd Bakhori, Z. Hassan, H.A. Hassan, V.A. Yakovlev, N.N. Novikova, E.A. Vinogradov. *Opt. Express*, **18** (10), 10354 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.010354
- [19] N.N. Novikova, V.A. Yakovlev, E.A. Vinogradov, S.S. Ng, Z. Hassan, H. Abu Hassan. *Appl. Surface Sci.*, **267**, 93 (2013). DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.07.157
- [20] A. Sartori, N. El Habra, M. Bolzan, G. Rossetto, S. Sitran, D. Barreca, A. Gasparotto, M. Casarin. *Chem. Mater.*, **23** (5), 1113 (2013). DOI: 10.1021/cm1020788
- [21] A. Otto. *Z. Phys.*, **216**, 398 (1968). DOI: 10.1007/BF01391532
- [22] G. Borstel, H.J. Falge, A. Otto. In: *Solid-State Physics. Springer Tracts in Modern Physics* (Springer, Berlin, Heidelberg, 1974), vol. 74, p. 107–148. DOI: 10.1007/BFb0041387
- [23] A.S. Barker Jr. *Phys. Rev.*, **132**, 1474 (1963). DOI: 10.1103/PhysRev.132.1474
- [24] A. Mitsuishi, H. Yoshinaga, S. Fujita, Y. Suemoto. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1**, 1 (1962). DOI: 10.1143/JJAP.1.1
- [25] Y. Kumagai, H. Yokoi, H. Tampo, Y. Tabata, N. Kuroda. *J. Phys. Soc. Jpn.*, **81**, 1 (2012). DOI: 10.1143/JPSJ.81.024709
- [26] L. Pauling, S.B. Hendricks. *J. Am. Chem. Soc.*, **47**, 781 (1925). DOI: 10.1021/ja01680a027
- [27] R.E. Newnham, Y.M. de Haan. *Zeitschrift für Kristallographie*, **117** (2–3), 235 (1962). DOI: 10.1524/zkri.1962.117.2-3.235
- [28] W. Theiß. *Hard- and Software, SCOUT, Technical Manual [Электронный ресурс]*. URL: www.mtheiss.com
- [29] M. Krüger, S. Hilbrich, M. Thönissen, D. Scheyen, W. Theiß, H. Lüth. *Opt. Commun.*, **146**, 309 (1998). DOI: 10.1016/S0030-4018(97)00513-0.
- [30] A.B. Kuzmenko. *Rev. Sci. Instruments*, **76**, 083108 (2005). DOI: 10.1063/1.1979470
- [31] J. F. Scott, S. P. S. Porto. *Phys. Rev.*, **161**, 903 (1967). DOI: 10.1103/PhysRev.161.903
- [32] F. Gervais, B. Piriou. *Phys. Rev. B*, **11**, 3944 (1975). DOI: 10.1103/PhysRevB.11.3944
- [33] S.A. Klimin, A.B. Kuzmenko, M.A. Kashchenko, M.N. Popova. *Phys. Rev. B*, **93**, 054304 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.054304
- [34] F. Gervais. *Opt. Commun.*, **22**, 116 (1977). DOI: 10.1016/0030-4018(77)90260-7
- [35] Е.А. Виноградов, Б.Н. Маврин, Н.Н. Новикова, В.А. Яковлев. *УФН*, **179** (3), 313 (2009). DOI: 10.3367/UFNR.0179.200903l.0313 [E.A. Vinogradov, B.N. Mavrin, N.N. Novikova, V.A. Yakovlev. *Physics-Uspekhi*, **52** (3), 290 (2009). DOI: 10.3367/ufne.0179.200903l.0313].
- [36] Е.А. Виноградов. *УФН*, **190**, 829 (2020). DOI: 10.3367/UFNR.2020.01.038719 [E.A. Vinogradov. *Physics-Uspekhi*, **63** (88), 775 (2020). DOI: 10.3367/UFNe.2020.01.038719].
- [37] В.А. Яковлев, Н.Н. Новикова, А.Д. Молчанова, В.А. Чернышев, С.А. Климин. *ФТТ*, **66**, 981 (2024).
- [38] J.R. Jasperse, A. Kahan, J.N. Plendl, S.S. Mitra. *Phys. Rev.*, **146**, 526 (1966). DOI: 10.1103/PhysRev.146.526

- [39] G. Andermann, E. Duesler. *J. Opt. Soc. Am.*, **60** (1), 53 (1970). DOI: 10.1364/JOSA.60.000053
- [40] P. Giura, L. Paulatto, F. He, R.P.S.M. Lobo, A. Bosak, E. Calandrini, L. Paolasini, D. Antonangeli. *Phys. Rev. B*, **99**, 220304 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevB.99.220304
- [41] A.M. Hofmeister, E. Keppel, A.K. Speck. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **345** (1), 16 (2003). DOI: 10.1046/j.1365-8711.2003.06899.x
- [42] V.G. Tsirel'son, A.S. Avilov, Yu.A. Abramov, E.L. Belokoneva, R. Kitaneh, D. Feil. *Acta Crystallographica, Section B: Structural Science*, **54**, 8 (1998). DOI: 10.1107/S0108768197008963
- [43] H.J. Falge, A. Otto. *Phys. Stat. Sol. (b)*, **56**, 523 (1973). DOI: 10.1002/pssb.2220560213