

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 45-летию Института спектроскопии РАН

*Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 23 октября 2013 г.*

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201406f.0653

23 октября 2013 г. в Институте спектроскопии Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук (ОФН) РАН, посвящённая 45-летию Института спектроскопии РАН (ИСАН).

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.gpad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Виноградов Е.А.** (ИСАН, Троицк, Москва). *Основные достижения ИСАН в 2009–2013 гг.*

2. **Балыкин В.И.** (ИСАН, Троицк, Москва). *Атомная и фотонная нанооптика.*

3. **Лозовик Ю.Е.** (ИСАН, Троицк, Москва). *Электронные и коллективные свойства топологических изолаторов.*

4. **Евдокимов Ю.М.** (Институт молекулярной биологии им. В.А. Энгельгардта РАН, Москва), **Компанец О.Н.** (ИСАН, Троицк, Москва). *Структурная нанотехнология ДНК (жидкокристаллический подход) и её применения.*

5. **Чекалин С.В.** (ИСАН, Троицк, Москва). *Фемтосекундная спектроскопия перспективных материалов.*

Статьи, написанные на основе докладов 1, 2, 4 и 5, публикуются ниже.

информации. Для исследования физических свойств таких образцов до сих пор нет спектрометров с необходимой фотометрической точностью, поскольку слабый спектр поглощения тонкой плёнки не виден на фоне спектра подложки. В ряде случаев для определения физических параметров наноплёнок полезно использовать спектроскопию поверхностных поляритонов. Поверхностные поляритоны (ПП) являются нерадиационными электромагнитными возбуждениями, распространяющимися вдоль границы раздела сред, причём поле ПП сосредоточивается непосредственно у этой границы и экспоненциально убывает при удалении от неё [1–4].

Поле ПП вблизи поверхности (границы раздела) является ближним полем, и его напряжённость значительно превышает напряжённость флуктуационного теплового дальнего поля [1–3]. В силу этого свойства спектры ПП могут оказаться очень чувствительными к характеристикам границы раздела. Это особенно важно, поскольку в большинстве случаев свойства плёнок сильно отличаются от свойств объёмных материалов, из которых они изготовлены, и, кроме того, в процессе осаждения (роста) плёнок может изменяться структура приповерхностного слоя подложки [5].

Аналитические возможности спектроскопии ПП резко возрастают, если частоты оптических фононов плёнки попадают в частотную область существования ПП подложки. Вследствие резонанса возникает расщепление и сдвиг спектров ПП подложки. В этом случае экспериментальные данные позволяют определить диэлектрические проницаемости и плёнки, и подложки, а также толщину плёнки и охарактеризовать структуру. Возникающая при этом щель в дисперсионных кривых ПП подложки пропорциональна корню квадратному из толщины плёнки, что позволяет оценивать толщину очень тонких плёнок [4, 6].

В настоящей статье обсуждается, как спектроскопия поверхностных фононных поляритонов становится уникальным источником информации о физических свойствах сверхтонких плёнок на поверхностях монокристаллов.

2. Экспериментальные результаты

В качестве примера рассмотрим экспериментальные результаты исследования оптических свойств плёнок

Е.А. Виноградов, Н.Н. Новикова, В.А. Яковлев

1. Введение

Для использования тонких плёнок широкозонных полупроводников в различных приложениях, в том числе в оптоэлектронике, требуется знать их физические свойства. Однако традиционные спектры отражения, пропускания и отражения–поглощения (спектры в дальнем поле) структур с тонкими плёнками не дают желаемой

Е.А. Виноградов, Н.Н. Новикова, В.А. Яковлев. Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, РФ
E-mail: evinogr@isan.troitsk.ru

MgO (толщиной 10, 30, 100 и 300 нм) [7] и плёнок AlN (толщиной 2, 40 и 400 нм) [8, 9] на сапфире (оптическая ось подложки перпендикулярна поверхности). Спектры внешнего (в дальнем поле) отражения измерялись инфракрасным (ИК) фурье-спектрометром IFS66v (фирмы "Брукер") при углах, близких к нормальному падению.

Поверхностные поляритоны — электромагнитные возбуждения ближнего поля — являются нерадиационными возбуждениями, обладающими волновым вектором, большим волнового вектора света в вакууме, и поэтому ПП не взаимодействуют с внешним электромагнитным полем в обычных условиях [10, 11]. Призма нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), установленная с некоторым зазором над образцом, позволяет согласовать волновые векторы ПП и возбуждающего его света и тем самым обеспечить резонансное поглощение света поверхностным поляритоном. При этом происходит возмущение поля ПП призмой и электромагнитное поле ПП, являющееся в отсутствие призмы ближним полем, преобразуется призмой в дальнее поле, которое и регистрируется стандартным способом ИК-спектроскопии [1, 2, 4]. Спектры ПП были получены с помощью призмы НПВО из монокристалла галогенидов таллия (КРС-5), устанавливаемой над плёнкой на сапфире с разными зазорами, а также ИК-фурье-спектрометра IFS66v при различных (больших критического) углах падения света в призме [1, 2, 4].

В спектрах отражения в дальнем поле плёнок MgO на сапфире (рис. 1) слои MgO толщиной 10 и 30 нм не видны, а при толщинах 100 и 300 нм спектр изменяется только в низкочастотной области (вблизи частоты 400 cm^{-1}) вследствие резонанса поперечного (ТО) фонона оксида магния и низкочастотного ТО-фонона сапфира. Даже для относительно толстых плёнок MgO этих экспериментальных данных недостаточно для корректного определения диэлектрической проницаемости плёнки.

На рисунке 2 представлены спектры НПВО (ближнего поля) при различных углах падения света внутри призмы для исходного сапфира и сапфира с плёнкой MgO толщиной 100 нм. Следует отметить, что оптимальная толщина зазора между призмой НПВО и поверхностью образца должна быть порядка длины волны ПП, которая обратно пропорциональна величине волнового век-

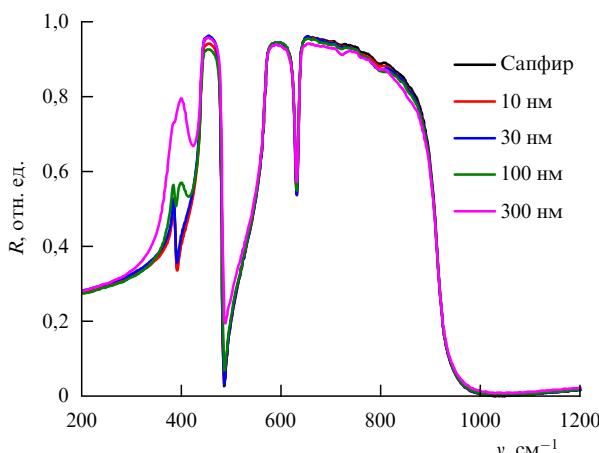


Рис. 1. (В цвете онлайн.) Спектры отражения плёнок MgO толщиной 10, 30, 100 и 300 нм на сапфире при нормальном падении света в дальнем поле [7].

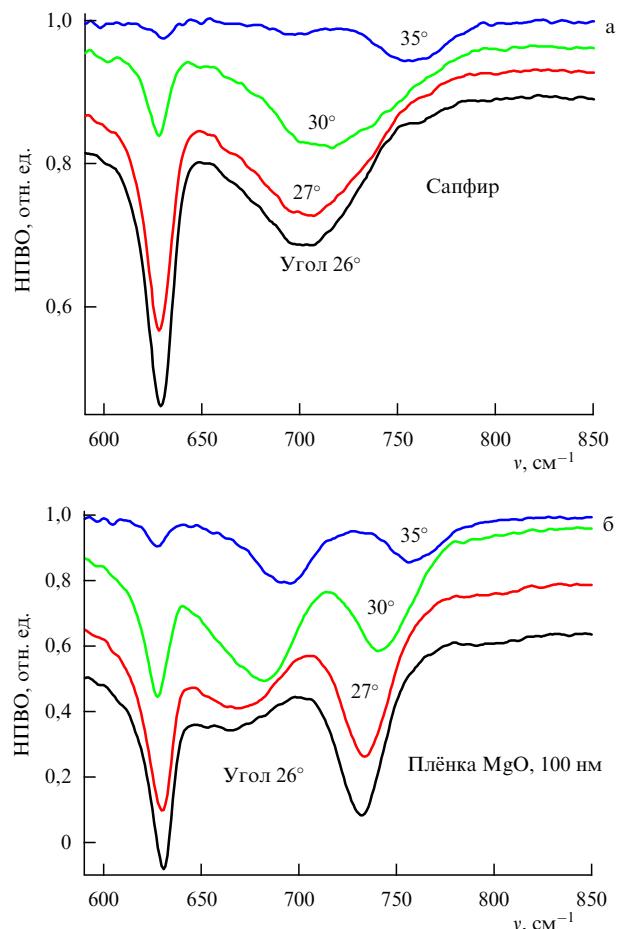


Рис. 2. Спектры НПВО (а) сапфира, (б) плёнки MgO толщиной 100 нм на сапфире для четырёх углов падения света в призме из КРС-5. (Спектры сдвинуты вдоль оси ординат, чтобы избежать их перекрытия).

тора ПП, параллельного границе раздела. Волновой вектор ПП в свою очередь пропорционален как коэффициенту преломления материала призмы, так и синусу угла падения света в призме.

Полосы поглощения в спектрах НПВО сапфира обусловлены ПП границы раздела сапфир–вакуум. Зависимости частот этих полос от угла падения света в призме дают дисперсию ПП, т.е. зависимость частоты от волнового вектора [7–11].

Как видно из рис. 2б, плёнка MgO радикально изменяет спектр ПП сапфира вследствие резонанса частот ПП сапфира и продольного оптического фонона плёнки MgO . Это взаимодействие приводит к расщеплению высокочастотной ветви ПП сапфира при частотах, близких к 700 cm^{-1} .

Спектры НПВО, как известно, очень чувствительны к величине зазора между образцом и призмой, поскольку призма возмущает поле ПП. Для корректного измерения частоты и полуширины полосы поглощения ПП при разных углах падения света в призме (разных волновых векторах ПП) необходимо экспериментально подобрать такой зазор, при котором интенсивность измеряемой полосы находилась бы на уровне нескольких процентов. В этом случае возмущение ПП призмой невелико.

Частотно-угловая зависимость ПП определяет его дисперсию. Дисперсия ПП хорошо описывается теорети-

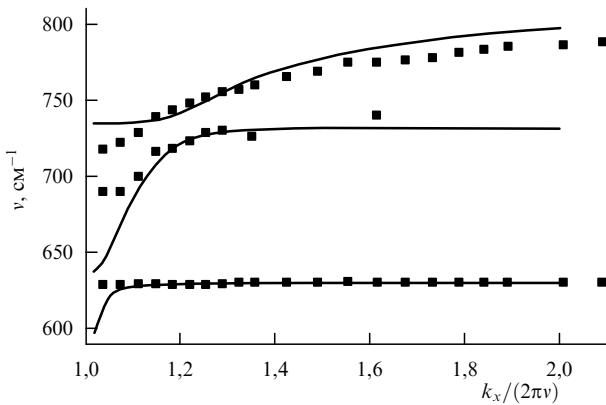


Рис. 3. Дисперсия поверхностных поляритонов структуры "плёнка MgO толщиной 10 нм на сапфире". Тёмными квадратами показаны экспериментальные данные, сплошными кривыми — результаты расчёта с использованием оптических констант объёмных MgO и сапфира.

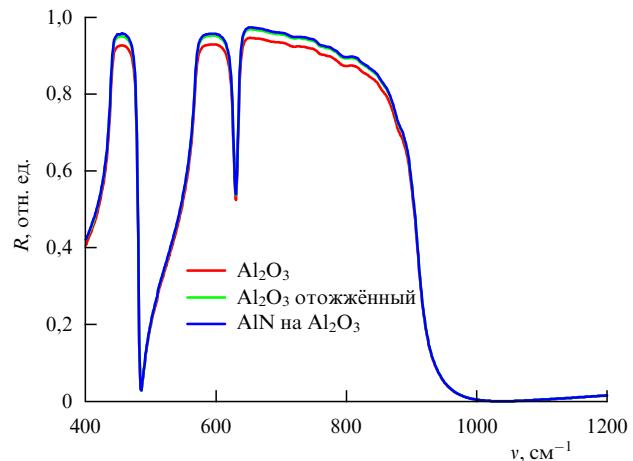


Рис. 4. Спектры внешнего отражения монокристаллов сапфира до и после отжига, а также после нитридизации сапфира [8].

чески, если известны диэлектрические проницаемости и плёнки, и подложки, а также толщина плёнки. Из угловой зависимости спектров НПВО восстанавливалась дисперсия ПП сапфира с плёнкой. Эта дисперсия сравнивалась с дисперсией ПП, рассчитанной [4] с использованием диэлектрической проницаемости сапфира (полученной из дисперсионного анализа спектров внешнего отражения сапфира без плёнки (см. рис. 1, а также рис. 4 ниже)), константы которой в пределах погрешности совпадают с таковыми в работе [12]. В этих расчётах параметры диэлектрической проницаемости плёнки варьировались с целью получения наилучшего согласования рассчитанной дисперсии ПП с экспериментальными частотно-угловыми спектрами. На рисунке 3 представлены дисперсионные кривые ПП плёнки MgO толщиной 10 нм на сапфире, которую в спектрах дальнего поля совсем не было видно.

3. Обсуждение

Кривые дисперсии поверхностных поляритонов, аналогичные представленным на рис. 3, были получены и для плёнок MgO толщиной 30, 100 и 300 нм [7]. Наилучшее согласие рассчитанных дисперсионных кривых при варьировании в расчётах частот оптических фононов плёнок, их сил осцилляторов и постоянных затухания позволяет восстановить оптические постоянные (диэлектрические проницаемости) плёнок на сапфире.

Отметим, что оптические константы плёнок MgO толщиной 10 нм оказались очень близкими к таковым для объёмного MgO, в отличие от оптических констант более толстых плёнок. Известно, что плёнки хорошего качества растут без больших напряжений, если постоянные кристаллических решёток плёнки и подложки близки между собой. В противном случае в процессе роста плёнок возникают сильные напряжения, из-за которых частоты оптических фононов сдвигаются, изменяются их силы осцилляторов и постоянные затухания. Кроме того, эти напряжения приводят к образованию так называемых дислокаций несоответствия, уменьшающих напряжения в плёнках, но ухудшающих некоторые важные для приложений характеристики материала плёнки.

Следует также отметить, что при корректном измерении спектров при большом числе углов падения света

внутри призмы спектроскопия НПВО фактически становится и количественным методом измерения диэлектрической проницаемости сверхтонких плёнок, в том числе и монослоевых плёнок, к которым, казалось бы, концепция макроскопической диэлектрической проницаемости не применима. Тем не менее, как видно из приведённых выше результатов, диэлектрическая проницаемость плёнки MgO толщиной 10 нм хорошо описывается стандартной моделью диэлектрической проницаемости объёмного MgO.

Интересный результат получен также при исследовании монослоевых плёнок AlN на сапфире [8]. При отжиге кристаллов сапфира в потоке азота при температуре более 900 °C происходит замещение кислорода в сапфире азотом и рождаются монослои за монослоем AlN [8, 9]. На рисунке 4 представлены спектры внешнего отражения сапфира до и после отжига, а также в процессе нитридизации. Эти спектры практически не отличаются друг от друга.

В спектрах "ближнего поля" в режиме НПВО (рис. 5) в области частоты 700 см⁻¹ (вблизи частоты поперечного оптического фонона AlN), так же как и в случае плёнок MgO на сапфире (рис. 2б), наблюдалось расщепление дисперсионной кривой ПП сапфира [8, 9] (рис. 6). Из

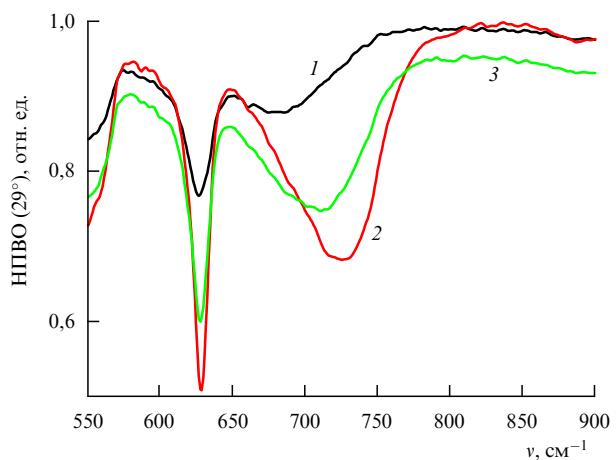


Рис. 5. Спектры НПВО для неотожжёного (кривая 1), отожжённого (кривая 2) и нитридированного (кривая 3) сапфира.

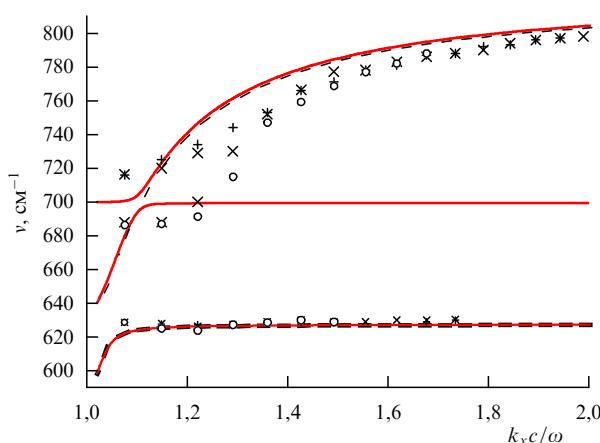


Рис. 6. (в цвете онлайн.) Дисперсия поверхностных поляритонов неотожжённого (кружки), отожжённого (прямые кресты) и нитридизированного сапфира (косые кресты). Расчётные кривые получены для сапфира без плёнки (чёрные штриховые кривые) и сапфира с плёнкой AlN толщиной 2 нм (сплошные красные кривые).

этих экспериментальных данных получены частоты по-переочных фонов AlN (700 cm^{-1}) и продольных колебаний (890 cm^{-1}), а также их силы осцилляторов для плёнок AlN толщиной 1 и 2 нм [8], а в работе [9] — для плёнок AlN на сапфире толщиной 25 и 400 нм.

Последовательное изучение оптических характеристик AlN в процессе наращивания монослоя за монослоем позволит, по-видимому, ответить на очень важные вопросы, а именно: как формируются слои AlN, как изменяются их характеристики в результате огромных напряжений в них вследствие большого рассогласования постоянных кристаллической решётки, как трансформируются поверхностные слои сапфира.

К сожалению, в настоящее время нет прямых, не возмущающих поверхность кристалла, способов измерения флюктуационных полей поверхностных электромагнитных возбуждений и спектроскопия ближнего поля (в режиме НПВО), по-видимому, является наиболее "нежным" методом исследования поверхности кристаллов и тонких плёнок на их поверхности.

4. Заключение

При корректном измерении спектров НПВО при большом числе углов падения света внутри призмы спектроскопия НПВО фактически становится количественным методом измерения диэлектрической проницаемости сверхтонких плёнок, в том числе монослоевых, к которым, казалось бы, неприменима концепция макроскопической диэлектрической проницаемости. Тем не менее, как видно из приведённых выше результатов, плёнка MgO толщиной 10 нм и плёнка AlN толщиной 1 и 2 нм довольно хорошо описываются стандартной моделью диэлектрической проницаемости массивных MgO и AlN соответственно.

В настоящей статье продемонстрированы результаты исследований резонансного взаимодействия ПП подложки с оптическими фонами плёнок и измерений расщепления дисперсионных кривых ПП. Подтверждено, что это расщепление пропорционально корню квадратному из толщины плёнки. Показано, что методом спектроскопии НПВО можно определять ди-

электрические проницаемости тонких и сверхтонких плёнок.

Авторы благодарны G. Rossetto, A. Sartori, M. Bolzan (Istituto di Chimica Inorganica e delle Superfici, Padova, Italy) за приготовление образцов с плёнками MgO на сапфире, К.С. Журавлёву, В.Г. Мансурову и Т.В. Малину из Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, а также S.S. Ng, Z. Hassan, H. Abu Hassan (School of Physics, University Sains Malaysia) за приготовление образцов с плёнками AlN на сапфире. Работа поддержана грантом Программы фундаментальных исследований ОФН РАН "Физика новых материалов и структур" и грантом РФФИ 11-02-00325а.

Список литературы

1. Виноградов Е А, Дорофеев И А УФН **179** 449 (2009); Vinogradov E A, Dorofeyev I A *Phys. Usp.* **52** 425 (2009)
2. Dorofeyev I A, Vinogradov E A *Phys. Rep.* **504** 75 (2011)
3. Dorofeyev I A, Vinogradov E A *Laser Phys.* **23** 065903 (2013)
4. Zhizhin G N et al. *Appl. Spectrosc. Rev.* **18** (2) 171 (1982)
5. Oura K et al. *Surface Science. An Introduction* (Berlin: Springer-Verlag, 2003)
6. Agranovich V M, Malshukov A G *Opt. Commun.* **11** 169 (1974)
7. Yakovlev V A et al. *J. Nanopart. Res.* **13** 5841 (2011)
8. Novikova N N et al. *Surf. Coat. Technol.* **227** 58 (2013)
9. Yakovlev V A et al. *Phys. Lett. A* **373** 2382 (2009)
10. Виноградов Е А УФН **172** 1371 (2002); Vinogradov E A *Phys. Usp.* **45** 1213 (2002)
11. Виноградов Е А, Дорофеев И А *Термостимулированные электромагнитные поля твердых тел* (М.: Физматлит, 2010)
12. Barker A S (Jr.). *Phys. Rev.* **132** 1474 (1963)

PACS numbers: 42.50.Ex, **42.81.-i, 78.67.-n**
DOI: 10.3367/UFNr.0184.201406h.0656

Квантовое управление атомами и фотонами с помощью оптических нановолноводов

В.И. Балыкин

1. Введение

Исследования взаимодействия света и вещества на уровне единичных атомов и фотонов позволяют достичь не только более глубокого понимания квантовомеханического взаимодействия света и вещества, но и открывают перспективы новых квантовых технологий. На протяжении последних двух десятилетий развиты подходы, позволяющие реализовать взаимодействие на уровне единичных атомов и фотонов. Возможность реализации взаимодействия на одночастичном уровне лежит в основе концепции обработки и передачи квантовой информации [1, 2]: атомы рассматриваются как физические объекты, которые могут хранить и обрабатывать информацию, фотоны — как объекты для передачи информации на большие расстояния по квантовой информационной сети. Квантовая информационная сеть [1] может состоять, например, из единичных атомов (ионов, молекул или квантовых точек), представляющих собой адресуемые точки квантовой информационной

В.И. Балыкин. Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, РФ
E-mail: balykin@isan.troitsk.ru