

УДК 538.958; 538.975

© 1992

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КВАРЦА И СВЕРХТОНКИХ ПЛЕНОК НИОБИЯ ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПЭВ

Е. В. Алиева, Л. А. Кузик, Ф. А. Пудонин, В. А. Яковлев

Методами спектроскопии поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) проведены прямые измерения комплексной диэлектрической проницаемости кристаллического кварца и сверхтонких пленок ниобия ($<27 \text{ \AA}$) на нем в области генерации CO_2 лазера. Мнимая часть диэлектрической проницаемости пленок ниобия имеет максимумы при изменении толщины пленки ниобия. Действительная часть диэлектрической проницаемости становится отрицательной (т. е. пленка приобретает металлические свойства) при толщинах пленки свыше 9 \AA .

Спектроскопия поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) показала надежность и точность определения оптических постоянных металлических поверхностей и тонких пленок на них [1] в ИК диапазоне. Волновой вектор \hat{k} ПЭВ, распространяющейся по исследуемому образцу, несет в себе информацию об оптических постоянных граничащих сред. Так, для плоской границы раздела образец—вакуум частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости образца $\hat{\epsilon}(\omega)$ дает связь между волновым вектором \hat{k} и частотой ω

$$\hat{k} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\hat{\epsilon}(\omega)}{\hat{\epsilon}(\omega) + 1}}.$$

Амплитудные и фазовые измерения в спектроскопии ПЭВ позволяют измерить как действительную, так и мнимую части волнового вектора ПЭВ на металлических поверхностях с хорошей точностью, а по ним вычислить комплексную диэлектрическую проницаемость изучаемого образца. Действительная часть волнового вектора определяется по набегу фазы ПЭВ при ее распространении по образцу, при этом используются интерференционные измерения (фазовая спектроскопия ПЭВ). Мнимая часть волнового вектора характеризует затухание ПЭВ вдоль поверхности образца и определяется по длине пробега ПЭВ L

$$\text{Im } \hat{k} = (4\pi\nu L)^{-1}.$$

Прямое измерение длины пробега ПЭВ на диэлектриках связано с трудностями, так как затухание в 10^2 — 10^3 раз превосходит затухание ПЭВ на металлических образцах. Это требует миниатюризации эксперимента. В данной работе мы провели прямые измерения комплексного волнового вектора ПЭВ на кристаллическом кварце со сверхтонкими пленками ниобия.

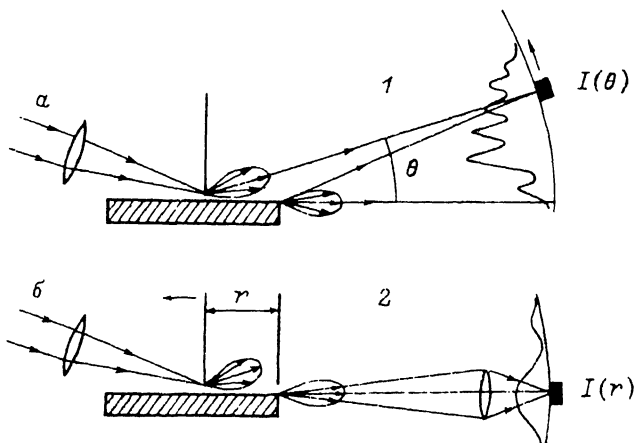


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента по определению действительной (1) и мнимой (2) частей волнового вектора ПЭВ на образцах кварца с пленками.

1. Эксперимент

Исследовались образцы кристаллического α -кварца, вырезанные параллельно оптической оси и отполированные на смоле. Размер образцов $15 \times 15 \times 3$ мм, оптическая ось лежит в плоскости образца и направлена вдоль ребра. Пленки ниобия на кварцевые подложки наносились методом высокочастотного распыления на установке Sputron-II [2]. Для предохранения ниобия от окисления атмосферным кислородом на образцы наносилась защитная пленка кремния толщиной 50 \AA .

Изучалось распространение ПЭВ перпендикулярно оптической оси кварца, так как в этом случае анизотропия оптических постоянных кварца не сказывается на измерениях различными методами. Величина действительной части волнового вектора ПЭВ на образцах измерялась с использованием апертурного возбуждения (рис. 1, а) [3]. Излучение CO_2 лазера фокусировалось на щель между образцом и экраном (металлическим лезвием). При этом наблюдается интерференция двух объемных волн, одна из которых получила дополнительный набег фазы при распространении в виде ПЭВ по изучаемому образцу. Пирозлектрический приемник равномерно перемещается по дуге окружности с центром на щели и регистрирует получающуюся интерференционную картину. Сигнал с приемника усиливается, поступает на АЦП, и его величина в каждой точке запоминается ЭВМ «Правец 16».

Величина щели между образцом и экраном выбиралась по оптимальному возбуждению ПЭВ на кварце, что соответствовало четкой интерференционной картине с глубокими минимумами. Полученная таким образом оптимальная величина щели измерялась по дифракции излучения He—Ne лазера (6328 \AA) на различных частотах генерации CO_2 лазера. В области существования ПЭВ на кварце она меняется в пределах $3\text{--}5$ мкм.

Совместная обработка нескольких (8—10) интерферограмм, полученных на фиксированной частоте при различных расстояниях, проходимых ПЭВ, позволила определить действительную часть волнового вектора ПЭВ с хорошей точностью ($\sim 2\%$). Обработка интерферограмм, а также увеличение их числа стали возможными благодаря использованию ЭВМ, что привело к значительному повышению точности измерения по сравнению с данными [4]. Результаты измерений частотной зависимости действительной части эффективного показателя преломления ПЭВ

Рис. 2. Частотная зависимость эффективного показателя преломления ПЭВ Δn и длины пробега ПЭВ L на образце кристаллического кварца.

Комплексный волновой вектор ПЭВ \hat{k} вычисляется по формуле

$$\text{Re} \hat{k} = (1 + \Delta n) \frac{2\pi\nu}{c}, \quad \text{Im} \hat{k} = (4\pi\nu L)^{-1}.$$

$$\Delta n = \frac{c}{2\pi\nu} \text{Re} \hat{k} - 1$$

на кварце приведены на рис. 2. Область частот ограничена областью существования ПЭВ на кварце и частотами генерации CO_2 лазера.

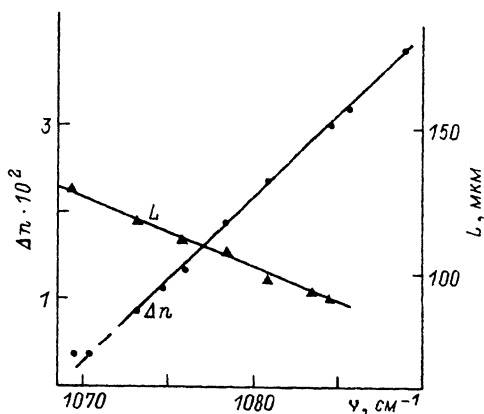
Величина длины пробега ПЭВ на кварцевых образцах измерялась с использованием двух экранов аналогично двухпризменным измерениям длины пробега ПЭВ по металлическим поверхностям [1]. Оптическая схема этих измерений приведена на рис. 1, б. На краю образца устанавливался второй экран (металлическое лезвие), обрезающий объемное излучение, распространяющееся над образцом. Величина щели между экраном и образцом выбиралась такой, что интерференционная картина исчезала, а появлялся один четко выраженный максимум в направлении распространения ПЭВ, срывающейся с края. Это соответствует величине щели порядка длины волны излучения, что приводит к большой дифракционной ширине излучения. Перед приемником устанавливалась небольшая фокусирующая линза, собирающая только часть излучения, пропорциональную интенсивности ПЭВ, дошедшей до края образца. Первый экран перемещался с помощью микрометрического винта, измерялась зависимость интенсивности сигнала с приемника от расстояния, пройденного ПЭВ. На каждой фиксированной частоте лазерного излучения измерения проводились несколько раз при различных положениях детектора в пределах дифракционной ширины излучения ПЭВ, величина щели между экраном и краем образца также варьировалась. Результаты измерений длины пробега ПЭВ воспроизводились с точностью 3—5%. На рис. 2 нанесены экспериментальные данные длины пробега ПЭВ по чистому кварцу, сплошная линия проведена через экспериментальные значения методом наименьших квадратов.

Такие изменения были проведены для чистого кварца, кварца с защитной пленкой кремния и кварца со сверхтонкими пленками ниобия, покрытыми защитной пленкой кремния.

2. Оптические постоянные кварца

Полученные значения комплексного волнового вектора ПЭВ на кварце были использованы для определения комплексной диэлектрической проницаемости кварца; результаты приведены в таблице. Там же приведены значения коэффициента отражения (угол падения 16° , поляризация перпендикулярно плоскости падения), вычисленные по данным $\hat{\epsilon}$. Для сравнения приведены значения коэффициента отражения этого образца кварца, полученные из спектров ИК отражения, снятых на Фурье-спектрометре ФС-02 (приставка ИПО-22).

Отметим отличие полученных оптических постоянных кварца от значений, полученных в работе [5], где длина пробега ПЭВ по кварцу измерялась с помощью решеток, нанесенных на поверхность кварца голографическим методом с использованием ионного травления. Полученные в [5] значения длин пробега



$\nu, \text{см}^{-1}$	$-\epsilon'$	ϵ''	$R_{\text{расчет по } \hat{\epsilon}}$	$R_{\text{экспер ФС-02}}$
1074.6	33.8 ± 0.7	18.4 ± 0.4	0.861 ± 0.005	0.872 ± 0.005
1076	29.9 ± 0.5	13.9 ± 0.3	0.869 ± 0.005	0.877 ± 0.005
1078.6	24.2 ± 0.3	8.8 ± 0.2	0.882 ± 0.005	0.887 ± 0.005
1081	20.0 ± 0.3	6.2 ± 0.1	0.887 ± 0.005	0.896 ± 0.005
1084.6	16.0 ± 0.3	4.1 ± 0.1	0.895 ± 0.005	0.902 ± 0.005

ПЭВ в 1.4 раза меньше, чем в нашем эксперименте. Это различие связано, видимо, с изменением оптических постоянных приповерхностного слоя кварца из-за нарушения и загрязнения поверхности при изготовлении решеток. С помощью апертурного метода мы измеряли длину пробега ПЭВ по чистому полированному кварцу.

3. Оптические постоянные пленок ниобия

Наличие пленок на кварце приводит к изменению комплексного волнового вектора ПЭВ [6]. Измерив величину волнового вектора ПЭВ на образце с защитной пленкой кремния (толщиной 50 Å), мы определили диэлектрическую проницаемость кремния ($20 + i 0.1$ на частоте 1084.6 см^{-1}).

Диэлектрическая проницаемость пленок ниобия рассчитывалась по дисперсионному соотношению для ПЭВ в четырехслойной системе «кварцевая подложка—пленка ниобия—пленка кремния—воздух» [7] с использованием экспериментальных значений комплексного волнового вектора ПЭВ на этих образцах. Полученные результаты представлены на рис. 3. При малых толщинах пленок Nb ($< 8 \text{ Å}$) ошибка в измерении оптических постоянных довольно велика, она обусловлена точностью измерений на данной установке. Видно, что действительная часть диэлектрической проницаемости пленки ниобия меняет знак на отрицательный (т. е. пленка приобретает металлические свойства) при толщине пленки $\sim 9 \text{ Å}$, а мнимая часть диэлектрической проницаемости имеет четко выраженные максимумы.

Было проведено несколько серий напыления пленок ниобия. Наблюдаемый в данной работе характер изменения диэлектрической проницаемости пленок ниобия с толщиной остается неизменным, но абсолютные значения оптических постоянных в разных сериях отличаются.

Отметим, что измерения спектров отражения и пропускания этих же пленок ниобия на кварцевых подложках в ближней ИК области $5000\text{—}3000 \text{ см}^{-1}$ показали, что мнимая часть диэлектрической проницаемости пленок ниобия в этой области спектра также имеет выраженные максимумы при этих толщинах пленок ниобия [8]. Такие же осцилляции мнимой части диэлектрической проницаемости наблюдаются на пленках ниобия, нанесенных на кремниевые подложки.

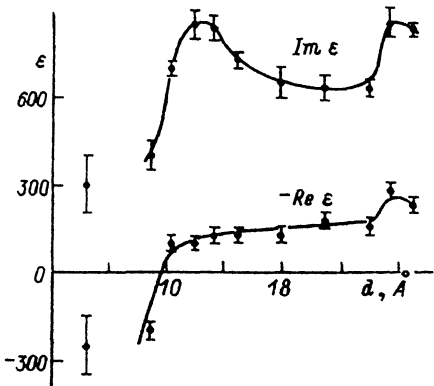


Рис. 3. Зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости пленок ниобия от толщины на частоте 1084.6 см^{-1} .

Список литературы

- [1] Silin V. I., Voronov S. A., Yakovlev V. A., Zhizhin G. N. // *International J. of Infrared and Millimeter Waves*. 1989. V. 10. N 1. P. 101—120.
- [2] Плотников А. Ф., Пудонин Ф. А., Стопачинский В. П. // *Письма в ЖЭТФ*. 1987. Т. 46. № 11. С. 443—446.
- [3] Alieva E. V., Firsov E. I., Kuzik L. A., Yakovlev V. A., Pudonin F. A. // *Phys. Lett. A*. 1991. V. 152. N 1, 2. P. 89—95.
- [4] Воронов С. А., Жижин Г. Н., Уваров Ф. А., Яковлев В. А. // *ФТТ*. 1986. Т. 28. № 10. С. 3206—3208.
- [5] Жижин Г. Н., Масленников В. А., Силин В. И., Сычугов В. А., Яковлев В. А. // *ФТТ*. 1985. Т. 27. № 1. С. 198—200.
- [6] Antonova K. T., Voronov S. A., Yakovlev V. A., Zhizhin G. N. // *Opt. Comm.* 1986. V. 60. N 4. P. 222—224.
- [7] Поверхностные поляритоны / Под ред. В. М. Аграновича и Д. Л. Милса. М.: Наука, 1985. 525 с.
- [8] Kuzik L. A., Spiridonov V. N., Yakovlev V. A., Zhizhin G. N., Pudonin F. A., Grosse P., Heinz B. // *Proceedings of the 8th International Conference on Fourier Transform Spectroscopy*.

Институт спектроскопии РАН
Троицк
Московская обл.

Поступило в Редакцию
13 февраля 1991 г.
В окончательной редакции
10 июня 1992 г.