

**СЕЛЕКТИВНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ
ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ПО МЕТАЛЛУ
В ПРИСУТСТВИИ ТОНКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ**

*Г.Н. Жижин, М.А. Москалева, Е.В. Шомина,
В.А. Яковлев*

Сообщается о наблюдении максимума поглощения поверхностной электромагнитной волны диэлектрической пленкой на поверхности металла вблизи продольной частоты колебаний диэлектрика.

Поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ) инфракрасного диапазона, распространяющиеся по поверхности проводящих сред, удалось

наблюдать лишь с появлением достаточно мощных лазеров, хотя дискуссия о реальности ПЭВ велась в начале этого столетия [1]. Недавние эксперименты [2] показали, что такая волна довольно медленно затухает, распространяясь по поверхности металла: ее можно обнаружить на расстоянии в несколько сантиметров от места возбуждения. В отличие от плоской волны, падающей на поверхность металла, амплитуда ПЭВ на поверхности максимальна. Эти свойства ПЭВ делают ее особенно привлекательной для спектральных исследований очень тонких пленок диэлектриков ($10 \div 1000 \text{ \AA}$) на поверхности хорошо проводящих металлов. Заметное ослабление ПЭВ в таком случае может быть достигнуто не за счет толщины пленки, а за счет большой длины распространения ПЭВ по металлу. При этом изменение длины волны лазера позволило бы проследить характер селективного ослабления ПЭВ за счет спектра элементарных возбуждений материала пленки.

Как показали наши измерения, длина распространения ПЭВ существенно зависит от способа приготовления слоя металла и от состояния его поверхности [3]. Зная степень влияния этих эффектов, мы перешли к изучению частотно зависящего ослабления ПЭВ в материалах, обладающих интенсивным селективным поглощением, лежащим в области перестройки CO_2 лазера ($943 \div 1078 \text{ см}^{-1}$).

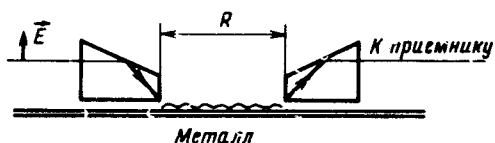


Рис. 1. Ход лучей через призмы

Теоретический анализ спектроскопии пленок с помощью ПЭВ [4,5] показал, что при наличии продольно-поперечного расщепления наибольшее ослабление ПЭВ должно происходить на частоте продольного колебания ω_{LO} . В экспериментальном исследовании, проведенном этой же группой (частное сообщение), было обнаружено селективное поглощение ПЭВ в пленке ацетата целлюлозы. Однако изученная полоса не обладает сколько-нибудь заметным продольно-поперечным расщеплением. Поэтому мы выбрали вещества, обладающие значительно более интенсивными полосами поглощения в этой области: монооксид кремния и апатит. Апатит — одноосный кристалл — в интересующей нас области является слабо анизотропным, имея [7] поперечные колебания $\omega_{TO} \sim 1046 \text{ см}^{-1}$ и продольные колебания $\omega_{LO} \sim 1030 \text{ см}^{-1}$. Пленки монооксида кремния обычно аморфны, поэтому, говоря о частотах поперечных колебаний, мы будем иметь в виду частоту, на которой максимальна мнимая часть диэлектрической проницаемости ($\sim 980 \text{ см}^{-1}$), а продольная частота — частота, на которой максимальна мнимая часть обратной диэлектрической проницаемости ($\sim 1130 \text{ см}^{-1}$) [7].

Для возбуждения ПЭВ и ее регистрации использовался видоизмененный метод НРВО двух призм (рис. 1). При падении пучка света под углом $\theta > \theta_{\text{крит}} = \text{arc sin } 1/n$ (n — коэффициент преломления призмы) под призмой создается экспоненциально затухающее поле. Проекция волно-

вого вектора k на направление распространения равняется

$$k = n \frac{\omega}{c} \sin \theta > \frac{\omega}{c} .$$

Подбором угла θ можно удовлетворить условию сохранения импульса. В этих условиях можно возбудить ПЭВ, если поместить исследуемую поверхность на некотором ($\sim \lambda$) расстоянии от призмы. Вторая призма позволяет принимать идущую по поверхности и экспоненциально затухающую ПЭВ. Форма призмы выбрана таким образом, чтобы лучи, входящие в первую призму и выходящие из второй, находились на оптической оси установки. Измеряя зависимость сигнала, выходящего из второй призмы, как функцию расстояния между призмами, можно определить длину распространения ПЭВ. Уравнение дисперсии поверхностного поляритона для металла, покрытого пленкой диэлектрика толщиной d , имеет вид [5]

$$\left(1 + \frac{\beta_1}{\beta_2}\right) \left(1 + \frac{\beta_2}{\beta_3}\right) - \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_2}\right) \left(1 - \frac{\beta_2}{\beta_3}\right) e^{-2\kappa_2 d} = 0, \quad (1)$$

где $\beta_i = \tilde{\epsilon}_i / \kappa_i$ и $\kappa_i = \frac{\omega}{c} \sqrt{k_x^2 - \tilde{\epsilon}_i}$; 1 - воздух, 2 - диэлектрик, 3 - металл.

Комплексный волновой вектор \tilde{k} входит в уравнение неявным образом. Для распространения (L) ПЭВ в такой системе, как и по чистому металлу, равна

$$L = 1/2 \operatorname{Im} \tilde{k} . \quad (2)$$

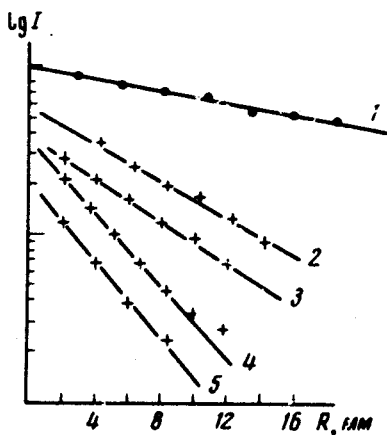


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала от расстояния между призмами для 1 - серебра и для серебра с пленкой апатита ($d = 200 \text{ \AA}$) при частотах 2 - 943 см^{-1} ; 3 - 970 см^{-1} ; 4 - 1050 см^{-1} ; 5 - 1078 см^{-1}

На рис. 2 приведены зависимости выходного сигнала от расстояния между призмами для серебра без пленки (1) и для серебра с пленкой апатита толщиной 200 \AA при различных частотах излучения CO_2 -лазера (2 - 5). Наклон прямых, проведенных через экспериментальные точки (в полулогарифмическом масштабе), позволяет определить длину распространения L (расстояние, на котором сигнал уменьшается в e раз), которая уменьшается при приближении к продольной частоте апатита,

при этом поперечная частота никак не проявляет себя: Такое же поведение длины распространения ПЭВ предсказывается и расчетом (сплошные линии на рис. 2).

Для того, чтобы исключить частотную зависимость длины распространения по чистому металлу ($\sim 1/\omega^2$) и рассматривать только влияние пленки, удобно ввести коэффициент поглощения ПЭВ пленкой [4, 5]

$$\alpha = \frac{L_0 - L}{L}$$

где L_0 — длина распространения ПЭВ по металлу без пленки, а L — по металлу в присутствии пленки. Частотные зависимости этой величины для различных толщин пленок монооксида кремния на меди приведены на рис. 3. На этом же рисунке даны экспериментальные результаты для пленки толщиной 230 Å. Так же, как и в случае апатита, коэффициент поглощения растет при приближении к частоте продольных колебаний пленки, тогда как частота поперечных колебаний остается "незамеченной".

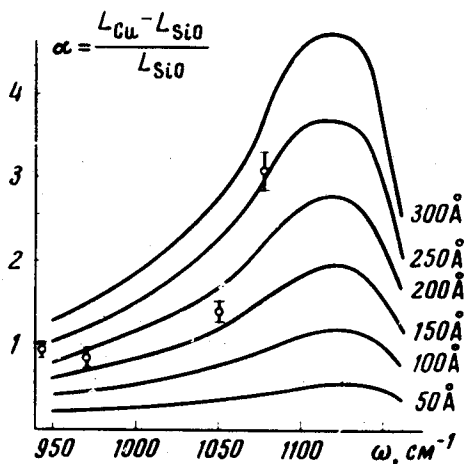


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента поглощения от толщины пленки монооксида кремния на меди. Кривые — расчет; точки — экспериментальные значения для пленки толщиной 230 Å

Таким образом, наши измерения подтверждают правильность теоретических предсказаний о том, что поглощение поверхностной электромагнитной волны тонкой пленкой происходит на частотах продольных колебаний. Это связано с тем, что поле ПЭВ имеет как поперечную, так и продольную компоненты, но поперечная компонента слабо взаимодействует с пленкой, так как она направлена перпендикулярно ей, в то время как продольная компонента параллельна пленке.

Авторы благодарны В.М.Аграновичу за идею эксперимента и обсуждение, В.А.Власову — за приготовление образцов с окисью кремния.

Институт спектроскопии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
9 июня 1976 г.

Литература

- [1] R.W.Wood. *Phil. Mag.*, 4, 396, 1902; 23, 310, 1912; *Phys. Rev.*, 48, 928, 1936; V.Fano. *JOSA*, 31, 213, 1941.

- [2] F. Shoenwald, E. Burstein, F. M. Elson. Sol. State Comm., 12, 185, 1973.
- [3] Г. Н. Жижин, О. И. Капустина, М. А. Москалева, В. Г. Назин, В. А. Яковлев. УФН, 117, 573, 1975.
- [4] В. М. Агранович, УФН, 115, 199, 1975.
- [5] R. F. Bell, R. W. Alexander, C. A. Ward, J. L. Tyler. Surface Science, 48, 253, 1975.
- [6] L. S. Kravitz, J. D. Kingsley, E. L. Elkin. J. Chem. Phys., 49, 4600, 1968.
- [7] F. T. Cox, G. Hass, W. R. Hunter. Appl. Opt., 14, 1247, 1975.
-