

05.2;09

Изменение типа резонансного отражения электромагнитного излучения в структурах „нанометровая металлическая пленка—диэлектрик“

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Поступило в Редакцию 23 мая 2006 г.

Теоретически предсказаны и обнаружены экспериментально два типа резонансного отражения электромагнитного излучения от слоистых металлodieлектрических структур с нанометровыми металлическими слоями. При малой толщине металлического слоя в таких структурах реализуется условие так называемого полуволнового резонанса, а при больших толщинах металлического слоя — четвертьволнового резонанса.

PACS: 81.07.-b

Введение

Современные методы молекулярно-лучевой эпитаксии позволяют создавать совершенные слои различных материалов толщиной в несколько нанометров и, в частности, металлические нанослои, нанесенные на изолирующие подложки. Применение слоистых структур на основе нанометровых металлических пленок в микро-, акусто-, СВЧ- и оптоэлектронике часто определяется способностью отражать электромагнитное излучение на различных частотах.

Известно, что коэффициент отражения электромагнитного излучения от металлических пленок, нанесенных на изолирующие подложки, быстро возрастает с ростом толщины пленки и уже при толщине ~ 10 nm достигает 70% в СВЧ-диапазоне. При этом зависимость коэффициента отражения от частоты зондирующего излучения слабо выражена [1,2].

Представляет интерес реализация ситуаций, когда незначительные изменения параметров металлических нанослоев существенным об-

разом влияют на характеристики взаимодействия электромагнитного излучения со слоистыми структурами, содержащими нанометровые металлические слои. Такая ситуация реализуется, в частности, если выполняются условия резонанса для электромагнитной волны, распространяющейся в слоистой структуре. Возможность реализации различных типов резонансного отражения электромагнитного излучения в слоистых структурах типа нанометровая пленка металла — диэлектрический слой ранее не рассматривалась.

Теоретическому описанию и экспериментальному исследованию особенностей отражения электромагнитного излучения от металлдиэлектрических слоистых структур с нанометровыми металлическими слоями, когда возможна реализация ситуации изменения типа резонансного отражения электромагнитного излучения в слоистых структурах, посвящена настоящая работа.

Коэффициент отражения электромагнитной волны от многослойной структуры

Расчетные соотношения. Будем считать, что исследуемая структура состоит из слоя диэлектрика толщиной t_d , металлического слоя толщиной t_m с электропроводностью σ_m и подложки толщиной t_s с электропроводностью σ_s (рис. 1).

Для расчета частотной зависимости коэффициентов отражения $R(\omega, t_m)$ и прохождения $T(\omega, t_m)$ структуры, изображенной на рис. 1 и состоящей из трех слоев ($N = 3$), могут быть использованы выражения [3,4]

$$R = -\frac{\mathbf{T}_N[2, 1]}{\mathbf{T}_N[2, 2]}, \quad (1)$$

$$T = \frac{\mathbf{T}_N[1, 1] \cdot \mathbf{T}_N[2, 2] - \mathbf{T}_N[1, 2] \cdot \mathbf{T}_N[2, 1]}{\mathbf{T}_N[2, 2]}, \quad (2)$$

в которых элементы $\mathbf{T}_3[1, 1]$, $\mathbf{T}_3[1, 2]$, $\mathbf{T}_3[2, 1]$ и $\mathbf{T}_3[2, 2]$ матрицы передачи \mathbf{T}_3 трехслойной структуры определяются из соотношения

$$\mathbf{T}_3 = \begin{pmatrix} \mathbf{T}_3[1, 1] & \mathbf{T}_3[1, 2] \\ \mathbf{T}_3[2, 1] & \mathbf{T}_3[2, 2] \end{pmatrix} = \prod_{j=3}^0 \mathbf{T}_{j(j+1)} = \mathbf{T}(z_{3,4})\mathbf{T}(z_{2,3}) \cdot \mathbf{T}(z_{1,2}) \cdot \mathbf{T}(z_{0,1}). \quad (3)$$

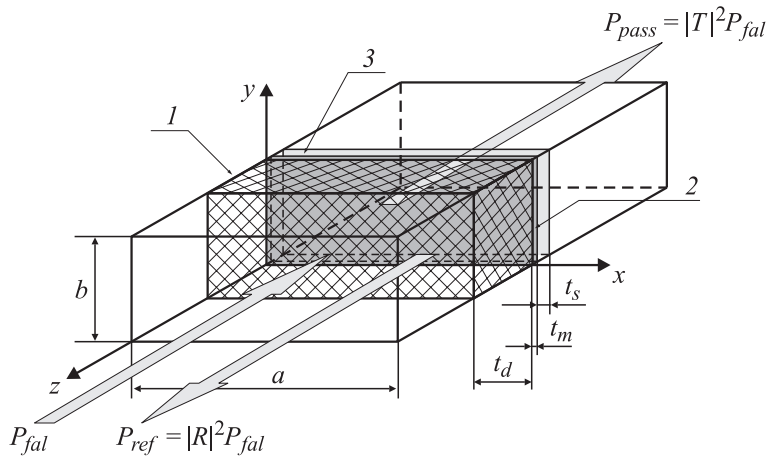


Рис. 1. Расположение исследуемой структуры в волноводе. P_{fal} , P_{ref} и P_{pass} — падающая, отраженная и прошедшая СВЧ-мощности: 1 — диэлектрик, 2 — металлическая пленка, 3 — подложка.

Выбрав в качестве начала отсчета поверхность диэлектрического слоя, на который падает электромагнитная волна (рис. 1), имеем $z_{0,1} = 0$, $z_{1,2} = t_d$, $z_{2,3} = t_d + t_m$, $z_{3,4} = t_d + t_m + t_s$:

$$T(z_{0,1} = 0) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_d + \gamma_0}{2\gamma_d} & \frac{\gamma_d - \gamma_0}{2\gamma_d} \\ \frac{\gamma_d - \gamma_0}{2\gamma_d} & \frac{\gamma_d + \gamma_0}{2\gamma_d} \end{pmatrix},$$

$$T(z_{1,2} = t_d) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_m + \gamma_d}{2\gamma_m} e^{(\gamma_m - \gamma_d)t_d} & \frac{\gamma_m - \gamma_d}{2\gamma_m} e^{(\gamma_m + \gamma_d)t_d} \\ \frac{\gamma_m - \gamma_d}{2\gamma_m} e^{-(\gamma_m + \gamma_d)t_d} & \frac{\gamma_m + \gamma_d}{2\gamma_m} e^{-(\gamma_m - \gamma_d)t_d} \end{pmatrix},$$

$$T(z_{2,3} = t_d + t_m) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_s + \gamma_m}{2\gamma_s} e^{(\gamma_s - \gamma_m)(t_d + t_m)} & \frac{\gamma_s - \gamma_m}{2\gamma_s} e^{(\gamma_s + \gamma_m)(t_d + t_m)} \\ \frac{\gamma_s - \gamma_m}{2\gamma_s} e^{-(\gamma_s + \gamma_m)(t_d + t_m)} & \frac{\gamma_s + \gamma_m}{2\gamma_s} e^{-(\gamma_s - \gamma_m)(t_d + t_m)} \end{pmatrix},$$

$$T(z_{3,4} = t_d + t_m + t_s) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_0 + \gamma_s}{2\gamma_0} e^{(\gamma_0 - \gamma_s)(t_d + t_m + t_s)} & \frac{\gamma_0 - \gamma_s}{2\gamma_0} e^{(\gamma_0 + \gamma_s)(t_d + t_m + t_s)} \\ \frac{\gamma_0 - \gamma_s}{2\gamma_0} e^{-(\gamma_0 + \gamma_s)(t_d + t_m + t_s)} & \frac{\gamma_0 + \gamma_s}{2\gamma_0} e^{-(\gamma_0 - \gamma_s)(t_d + t_m + t_s)} \end{pmatrix},$$

где γ_0 — постоянная распространения электромагнитной волны в области до и после измеряемой структуры, γ_m , γ_s , γ_d — постоянные

распространения электромагнитной волны в металлическом слое, в полужке, в слое диэлектрика.

В случае, когда исследуемая структура (рис. 1) помещается в прямоугольном волноводе и полностью заполняет его по поперечному сечению, постоянные распространения γ_0 , γ_m , γ_s , γ_d электромагнитной волны определяются выражениями [1,4,5]:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0}, \quad \gamma_{m,s} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_{m,s}^* \epsilon_0 \mu_{m,s} \mu_0},$$

$$\gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \epsilon_d \epsilon_0 \mu_0},$$

где $\epsilon_{m,s}^* = \epsilon'_{m,s} - j\epsilon''_{m,s}$ — комплексная диэлектрическая проницаемость металлического слоя и подложки, $\epsilon'_{m,s} = \epsilon_{Lm,s} - (\sigma_{m,s}^2 m_{m,s}^*) / (\epsilon_0 e^2 n_{m,s})$, $\epsilon''_{m,s} = \sigma_{m,s} / \epsilon_0 \omega$, $\epsilon_{Lm,s}$ — относительные диэлектрические проницаемости решетки металлического слоя и подложки, $\mu_{m,s}$ — относительные магнитные проницаемости металлического слоя и подложки, ϵ_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума, $\sigma_{m,s}$ — электропроводность металлического слоя и подложки, ϵ_d — относительная диэлектрическая проницаемость слоя, $m_{m,s}^*$ — эффективная масса носителей заряда в металлическом слое и подложке, $n_{m,s}$ — концентрация носителей заряда в металлическом слое и подложке, e — заряд электрона, a — размер широкой стенки волновода, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота электромагнитной волны.

Особенности отражения электромагнитного излучения от многослойной структуры с нанометровым металлическим слоем

Расчитанные с использованием соотношений (1) и (3) частотные зависимости коэффициентов отражения $R(\omega, t_m)$ электромагнитной волны от трехслойной структуры (рис. 1) имеют ярко выраженный резонансный характер. Использувавшиеся при расчетах параметры слоев приведены в подписи к рис. 2.

Расчеты показывают, что характерной особенностью отражения при отсутствии металлического слоя или при малой (менее 40 nm) его толщине, когда металлический слой частично прозрачен для электромагнитного излучения, является возможность реализации так

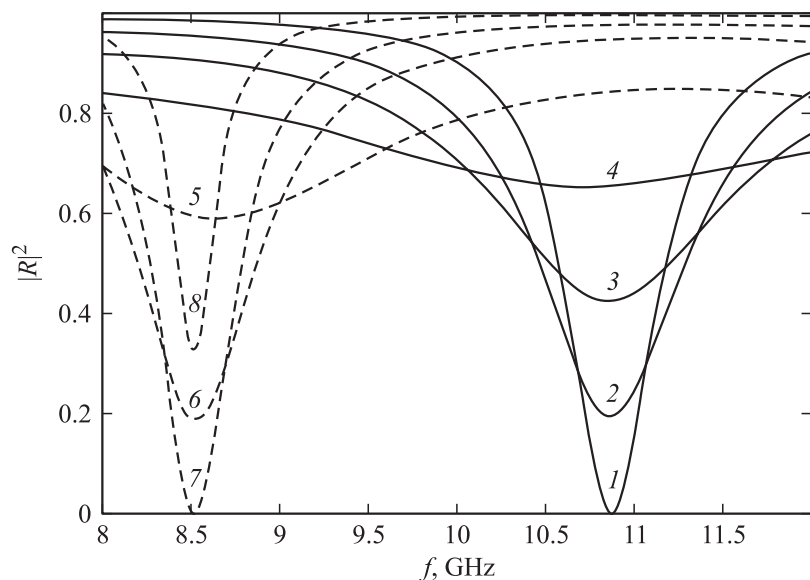


Рис. 2. Расчетные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(\omega, t_m)|^2$ электромагнитной волны от трехслойной структуры от частоты при различных значениях толщины t_m и электропроводности σ_m металлического слоя: 1 — $t_m = 0$, $\sigma_m = 0$; 2 — $t_m = 12$ nm, $\sigma_m = 2.5 \cdot 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; 3 — $t_m = 24$ nm, $\sigma_m = 3.2 \cdot 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; 4 — $t_m = 33$ nm, $\sigma_m = 5.7 \cdot 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; 5 — $t_m = 41$ nm, $\sigma_m = 1.2 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; 6 — $t_m = 70$ nm, $\sigma_m = 2.2 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; 7 — $t_m = 150$ nm, $\sigma_m = 2.2 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; 8 — $t_m = 650$ nm, $\sigma_m = 2.2 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; $\epsilon_d = 100$, $\epsilon_s = 9.6$, $t_d = 3$ mm, $t_s = 500 \mu\text{m}$.

называемого полуволнового резонанса, при котором на длине структуры укладывается целое число полуволн (сплошные кривые 1–4 на рис. 2). В этом случае слоистая структура эквивалентна разомкнутому отрезку линии передачи.

При толщинах металлического слоя более 60 nm реализуются условия для возникновения так называемого четвертьволнового резонанса, при котором на толщине диэлектрического слоя укладывается нечетное число величины $\lambda_{rez}/4$ (штриховые кривые 5–7 и 8 на рис. 2). В этом случае слоистая структура с нанесенным металлическим слоем эквива-

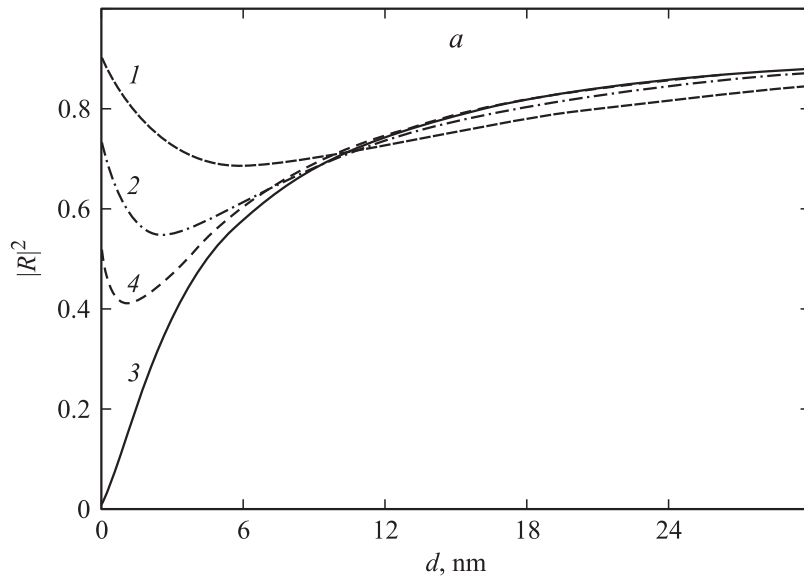


Рис. 3. Расчетные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(\omega, t_m)|^2$ электромагнитной волны от толщины металлического слоя трехслойной структуры на различных частотах f , GHz: 1 — 10, 2 — 10.4, 3 — 10.9, 4 — 11.2 (a); 1 — 8.4, 2 — 8.53, 3 — 8.8, 4 — 9.0 (b).

лентна короткозамкнутому отрезку линии передачи. Здесь λ_{rez} — длина волны зондирующего излучения в структуре на частоте резонанса.

Расчитанные с использованием соотношений (1) и (3) зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(\omega, t_m)|^2$ электромагнитной волны от толщины металлического слоя трехслойной структуры (рис. 1) представлены на рис. 3, a, b.

Выбором частоты зондирующего излучения из области полуволнового (рис. 3, a) или четвертьволнового (рис. 3, b) резонанса изменяется диапазон толщин металлического слоя, в котором наблюдается резкое изменение величины коэффициента отражения электромагнитного излучения от трехслойной структуры.

В области полуволнового резонанса коэффициент отражения приближается к насыщению при толщине металлического (хром) слоя, большей 50 nm, в то время как в области четвертьволнового резонанса

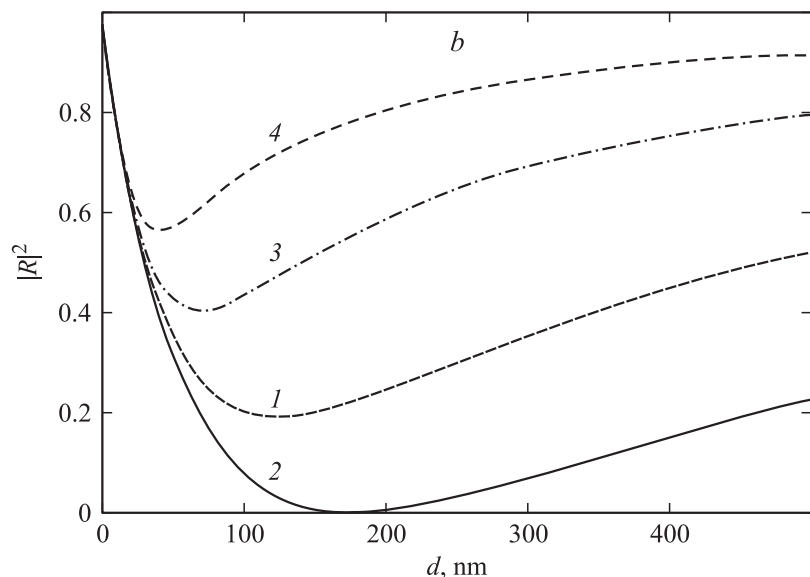


Рис. 3 (продолжение).

коэффициент отражения приближается к насыщению лишь при толщине металлического (хром) слоя, большей 3000 nm. Такой характер изменения типа резонансного отражения позволяет использовать частотные зависимости коэффициента отражения из различных областей резонансного отражения для измерения металлического слоя толщиной от единиц до тысяч нанометров.

Результаты экспериментальных исследований

В ходе экспериментальных исследований в диапазоне частот 8–12 GHz была измерена зависимость квадрата модуля коэффициента отражения электромагнитной волны, взаимодействующей с изображенной на рис. 1 структурой.

Экспериментально измерялись зависимости квадрата модуля коэффициента отражения СВЧ-излучения от трехслойных структур, состоящих из керамической пластины с $\epsilon_d = 100$ и толщиной 3 mm, титановых, нихромовых и ванадиевых пленок нанометровой толщины,

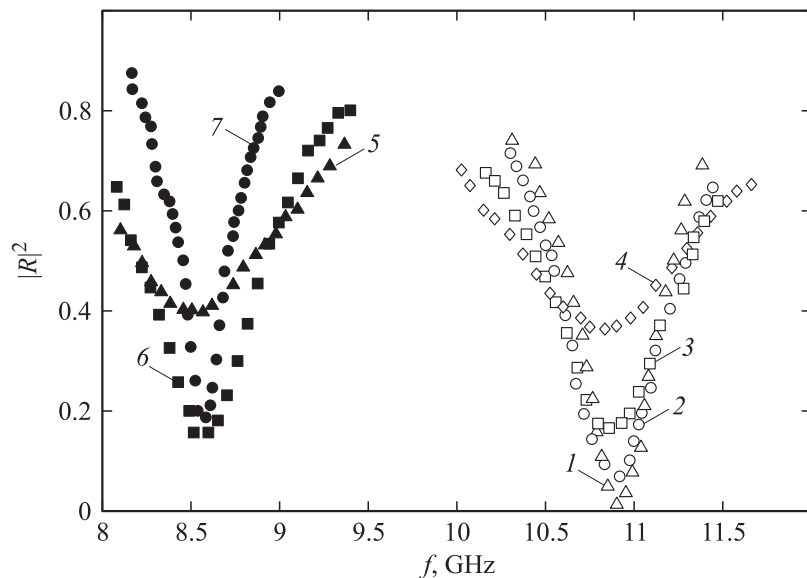


Рис. 4. Экспериментальные (дискретные кривые) зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(\omega, t_m, \sigma_m)|^2$ электромагнитной волны от трехслойной структуры при различных толщинах t_m металлического (хром) слоя на поликоровой подложке: 1 — $t_m = 0$ nm, 2 — $t_m = 11.9$ nm, 3 — $t_m = 18.2$ nm, 4 — $t_m = 20.9$ nm, 5 — $t_m = 76.2$ nm, 6 — $t_m = 144.7$ nm, на кремниевой подложке: 7 — $t_m = 400$ nm.

нанесенных на кремниевые подложки толщиной $500 \mu\text{m}$, и пленок хрома на керамических и стеклянных подложках. Коэффициент отражения измерялся с помощью панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61.

На рис. 4 представлены измеренные по описанной выше методике зависимости (дискретные кривые) квадратов модулей коэффициента отражения $|R_{\text{exp}}|^2$ электромагнитной волны от исследуемой структуры от частоты зондирующего сигнала. В качестве металлической пленки использовались слои хрома различной толщины, нанесенные методом термического испарения на керамические Al_2O_3 подложки и кремниевую пластину.

Из результатов проведенных измерений можно сделать вывод, что, как это и следует из расчетов, частотные зависимости квадратов модулей коэффициентов отражения $|R(\omega, t_m, \sigma_m)|^2$ электромагнитной волны от трехслойной структуры (рис. 1) имеют область резонансного отражения. При этом при отсутствии металлического слоя или при малой его толщине реализовалось условие так называемого полуволнового резонанса (дискретные кривые 1–4 на рис. 4).

При больших толщинах металлического слоя реализовалось условие для возникновения так называемого четвертьволнового резонанса (дискретные кривые 5–7 на рис. 4).

Заключение

Таким образом, теоретически описаны и экспериментально исследованы особенности отражения электромагнитного излучения от слоистых структур с нанометровыми металлическими слоями. Установлена возможность изменения типа резонансного отражения электромагнитного излучения в слоистых структурах от полуволнового резонанса при малой толщине нанометрового металлического слоя к четвертьволновому резонансу при больших толщинах металлического слоя. Отмечена возможность использования установленных зависимостей для измерения металлического слоя толщиной от единиц до тысяч нанометров.

Работа поддержана в рамках программы Министерства образования и науки РФ „Развитие научного потенциала высшей школы“, коды проектов: 2.8.06 и 2.9.06, грантом 05-08-17924, а РФФИ: ГК № 02.435.11.7012, ГК № 02.444.11.7318.

Список литературы

- [1] Гроссе П. Свободные электроны в твердых телах. М.: Мир, 1982. 270 с. (Grosse P. Freie Elektronen in Festkörpern. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979).
- [2] Чаплыгин Ю.А., Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Семенов А.А., Абрамов А.В., Голишников А.А. // Изв. вузов. Электроника. 2005. № 1. С. 68–77.

- [3] *Abramov A.V., Usanov D.A., Skripal A.V., Bogolyubov A.S.* // Proc. of 35th European Microwave Conference. Paris, France, 3–7th October 2005. V. 2. P. 509–512.
- [4] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 112–117.
- [5] *Усанов Д.А.* СВЧ-методы измерения параметров полупроводников. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. 55 с.