

גלים מישוריים:

$$\beta = |\vec{k}| = \frac{\omega}{c} n, \quad 2\pi = k\lambda, \quad \lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}}, \quad n \equiv \sqrt{\epsilon_r} \quad \vec{H} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{\omega\mu} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{\sqrt{\mu/\epsilon}} \left(\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \right) \quad \vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0 \cdot e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}}$$

קוטוב:

כללי: $\vec{E}(z) = (E_1 \hat{x} + E_2 e^{i\psi} \hat{y}) \cdot e^{-ikz}$, קוטוב ליניארי: $\vec{E}(0,t) = E_1 \cos(\omega t) \hat{x} \pm E_2 \cos(\omega t) \hat{y}$, $\psi = 0, \pm\pi \Rightarrow$
 קוטוב אליפטי: $\vec{E}(0,t) = E_1 \cos(\omega t) \hat{x} \mp E_2 \sin(\omega t) \hat{y}$, $\psi = \pm\pi/2 \Rightarrow$ (קוטוב מעגלי: $E_1 = E_2$)

התפשטות גלים בתווך:

הגדרות: $\vec{E} = E_0 e^{-i\gamma z} \hat{x} = E_0 e^{-\alpha z} e^{-i\beta z} \hat{x}$, $\gamma = \frac{\omega}{c} n \sqrt{1 - i \frac{\epsilon''}{\epsilon'}}$, $\beta - i\alpha$, $\epsilon_c = \epsilon - i \frac{\sigma}{\omega} \equiv \epsilon' - i\epsilon''$

תווך עם הפסדים נמוכים: $\beta \approx \frac{\omega}{c} n_{eff}$, $\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$, $n_{eff} = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \cdot \left(1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right)$

תווך עם הפסדים גבוהים – מוליך טוב:

דעיכת הספק: $\vec{S} = \frac{1}{2} |E_0|^2 \left(\frac{\beta + i\alpha}{\omega\mu} \right) e^{-2\alpha z} \hat{z}$, עומק חדירה: $\delta \approx \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}}$, $\beta \approx \alpha \approx \sqrt{\frac{\mu\omega\sigma}{2}}$

מהירות פאזה, מהירות חבורה ודיספרסיה:

הגדרות: $c = \frac{c_{vacuum}}{n} = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{k_{vacuum} n}$, מהירות פאזה: $v_p = \frac{\omega}{k}$, מהירות חבורה: $v_g = \left(\frac{\partial k}{\partial \omega} \right)^{-1}$, $\beta_2 =$ מקדם דיספרסיה

קווי תמסורת חשמליים:

$Z_{in} = Z_c \frac{\bar{Z}_L + i \tan(kl)}{1 + i\bar{Z}_L \tan(kl)}$, $Z_L \equiv \frac{V_L}{I_L} = Z_c \frac{(1 + \Gamma_L)}{(1 - \Gamma_L)}$, $\bar{Z}_L \equiv \frac{Z_L}{Z_c} = \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L}$, $Z_c \equiv \frac{V^+}{V^-} = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega]$, $\bar{Z}_c = 1$
 מקדם החזרה: $\Gamma_L \equiv \frac{V^-}{V^+} = \frac{\bar{Z}_L - 1}{\bar{Z}_L + 1}$, $\Gamma(z) = \Gamma_L \cdot e^{2ikz} = \frac{\bar{Z}(z) - 1}{\bar{Z}(z) + 1}$, $Z(z) \equiv \frac{V(z)}{I(z)} = \frac{\Gamma(z) + 1}{\Gamma(z) - 1} = \frac{\bar{Z}_L - i \tan(kz)}{1 - i\bar{Z}_L \tan(kz)} \cdot Z_c$

יחס גלים עומדים:

$|V|_{min} = |V^+| (1 - |\Gamma_L|)$, $|V|_{max} = |V^+| (1 + |\Gamma_L|)$, $V(z) = V^+ (1 + \Gamma_L e^{2ikz}) e^{-ikz}$, $VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$

המרחק בין 2 מקסימיני: $\lambda/2$, המרחק בין נקודת מקסימיני למיני: $\lambda/4$

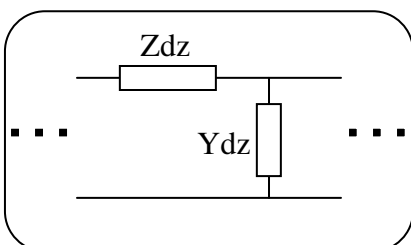
הספקים בקווי תמסורת:

גל מתקדם: $P^+ = \frac{|V^+|^2}{2Z_c}$, גל חוזר: $P^- = \frac{|V^-|^2}{2Z_c}$, $P = \frac{|V^+|^2}{2Z_c} (1 - |\Gamma_L|^2)$, $P = P^+ + P^-$

שנאי $\lambda/4$: $Z_2 = \sqrt{Z_L Z_c}$, Z_L ממשי! תיאום בעזרת גדם יחיד: $\bar{Y}_a = \bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 = 1 \Rightarrow \begin{cases} \text{Im}(\bar{Y}_1) = -\text{Im}(\bar{Y}_2) \\ \text{Re}(\bar{Y}_1) = 1, \text{Re}(\bar{Y}_2) = 0 \end{cases}$

תיאום להעברת הספק מקסימלי: $Z_g = Z_{in}^*$

קו תמסורת עם הפסדים:



$I(z) = Y_0 (Ae^{-\gamma z} - Be^{\gamma z})$, $V(z) = Ae^{-\gamma z} + Be^{\gamma z}$, $Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L \cosh \gamma l + Z_0 \sinh \gamma l}{Z_0 \cosh \gamma l + Z_L \sinh \gamma l}$
 כאשר: $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} = \alpha + i\beta$ עבור G, R קטנים: $\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$

משטחי הפרדה:

פגיעה ניצבת של גל מישורי במשטח בעל מוליכות סופית:

$$SWR = \frac{1+|r|}{1-|r|} \text{ : יגיע, } \vec{E}_r = (E_0^r \cdot e^{+ik_0z}) \hat{x} \text{ , } \vec{E}_i = (E_0^i \cdot e^{-ik_0z}) \hat{x} \text{ : גל פוגע,}$$

$$\vec{H}_r = (Y_0 \cdot E_0^r \cdot e^{+ik_0z}) \hat{y} \text{ : גל חוזר, } \vec{H}_i = (Y_0 \cdot E_0^i \cdot e^{-ik_0z}) \hat{y}$$

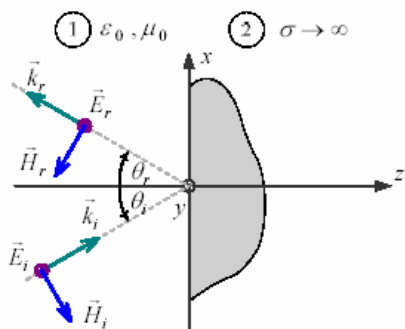
$$\delta \cong \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}}, Y_m = \sqrt{\frac{\sigma}{2\omega\mu}} \cdot (1-i) \text{ , } \vec{H}_t = \left(Y_m E_0^t \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \cdot e^{-i\frac{z}{\delta}} \right) \hat{y} \text{ , } \vec{E}_t = \left(E_0^t \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \cdot e^{-i\frac{z}{\delta}} \right) \hat{x} \text{ : גל עובר}$$

$$r \equiv \frac{E_0^r}{E_0^i} = \frac{Y_0 - Y_m}{Y_0 + Y_m} = \frac{Z_m - Z_0}{Z_0 + Z_m} \text{ : מקדם החזרה, } t \equiv \frac{E_0^t}{E_0^i} = \frac{2Y_0}{Y_0 + Y_m} = \frac{2Z_m}{Z_0 + Z_m} \text{ : מקדם העברה}$$

$$\vec{J}(z > 0) = \sigma \vec{E}_t e^{-\frac{z}{\delta}} e^{-i\frac{z}{\delta}} \hat{x} \text{ : צפיפות זרם} \quad 1 - |r|^2 = \frac{\sigma \delta \eta_0}{2} |t|^2 \text{ : תנאי רציפות}$$

$$\vec{J} = 2Y_0 E_0^i \cdot \delta(z) \hat{x} \text{ : כיסוי זרם, } \vec{E}_1 = -2E_0^i \sin(k_0 z) \text{ , } \vec{H}_1 = 2Y_0 E_0^i \cos(k_0 z) \text{ : עבור מוליכות אינסופית: } \sigma \rightarrow \infty (t \rightarrow 0, r \rightarrow -1)$$

פגיעת גל מישורי במוליך מושלם:



$$\vec{E}_r = -E_0 e^{-i(k_0 x \sin \theta - k_0 z \cos \theta)} \hat{y}$$

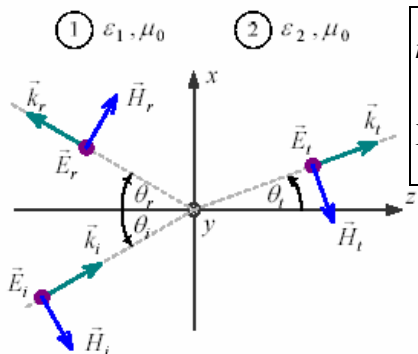
$$\vec{E}_1 = -2i E_0 e^{-ik_0 x \sin \theta} \sin(k_0 z \cos \theta) \hat{y}$$

$$\vec{H}_1 = \frac{E_0}{\eta_0} e^{-ik_0 x \sin \theta} \left\{ -2i \sin \theta \sin(k_0 z \cos \theta) \hat{z} - 2 \cos \theta \cos(k_0 z \cos \theta) \hat{x} \right\}$$

קיטוב מקביל:

$$\vec{E}_r = -\vec{E}_0 (\cos \theta \hat{x} + \sin \theta \hat{z}) e^{-j(k_0 x \sin \theta - k_0 z \cos \theta)}$$

פגיעת גל מישורי במשטח הפרדה בין שני חומרים דיאלקטיים:



$$n_1 \equiv \sqrt{\epsilon_{r,1}}, \quad n_2 \equiv \sqrt{\epsilon_{r,2}}, \quad |\vec{k}_i| = |\vec{k}_r| \equiv k_1 = \frac{\omega}{c} n_1, \quad |k_t| = k_2 = \frac{\omega}{c} n_2$$

$$Y_1 \equiv Y_0 \cdot n_1, \quad Y_2 \equiv Y_0 \cdot n_2, \quad n \equiv \frac{n_2}{n_1}, \quad \omega_1 = \omega_2 = \omega \text{ (!תמיד)}$$

הגדרות:

$$k_1 x \sin \theta_i = k_1 x \sin \theta_r = k_2 x \sin \theta_t \text{ : פאזה, } E_0^i + E_0^r = E_0^t$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\theta_1 \equiv \theta_i = \theta_r, \quad \theta_2 \equiv \theta_t$$

חוק סנל:

עבור קיטוב ניצב:

$$r_{\perp} \equiv \frac{E_0^r}{E_0^i} = \frac{\cos \theta_1 - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}}{\cos \theta_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}}, \quad t_{\perp} \equiv \frac{E_0^t}{E_0^i} = \frac{2 \cos \theta_1}{\cos \theta_1 + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}}$$

עבור קיטוב מקביל:

$$r_{\parallel} = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1} - n^2 \cos \theta_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1} + n^2 \cos \theta_1}, \quad t_{\parallel} = \frac{2n \cos \theta_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1} + n^2 \cos \theta_1}$$

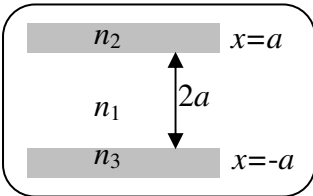
החלפה במישור מוליך מושלם במקרה של החזרה מלאה:

$$2k_1 d \cos \theta_1 + \pi = \psi \text{ : מרחק המשטח, } \psi = 2 \tan^{-1} \frac{n \sqrt{\sin^2 \theta_2 - 1}}{\cos \theta_1}$$

$$Z_{\perp} = \frac{\eta_0}{\cos \theta}, \quad Z_{\parallel} = \eta_0 \cos \theta \text{ : כאשר, } \frac{P_t}{P_i} = t^2 \operatorname{Re} \left(\frac{Z_i}{Z_L} \right) \text{ : הספקים}$$

זוויות מיוחדות:
זווית ברוסטר
 (רק עבור קיטוב מקביל):
 $\tan \theta_B = n$
הזווית הקריטית
 (רק כאשר $n_1 > n_2$):
 $\sin \theta_c = n$

פרוסה דיאלקטרית:



תדר מנורמל $v = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$
 מקדם שבירה אפקטיבי $n_{eff} = \frac{\beta}{k_0}$
 הגדרות:

$p^2 \equiv \beta^2 - (n_2 k_0)^2 = k_0^2 (n_{eff}^2 - n_2^2)$
 מקדמים: $q^2 \equiv (n_1 k_0)^2 - \beta^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_{eff}^2)$
 $h^2 \equiv \beta^2 - (n_3 k_0)^2 = k_0^2 (n_{eff}^2 - n_3^2)$

משוואות הגלים:

השדה החשמלי: $E(x) = \begin{cases} Ae^{-px} & x > a \\ Be^{-iqx} + Ce^{iqx} & -a \leq x \leq a \\ De^{hx} & x < -a \end{cases}$
 השדה המגנטי: $H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu} E_y$, $H_z(x) = \frac{i}{\omega\mu} \begin{cases} pAe^{-px} & x > a \\ iqBe^{-iqx} - iqCe^{iqx} & -a \leq x \leq a \\ -hDe^{hx} & x < -a \end{cases}$

$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - p^2 E = 0 \quad x > a$
 $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + q^2 E = 0 \quad -a \leq x \leq a$
 $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - h^2 E = 0 \quad x < -a$

משוואות שעל האופנים לקיים:
 עבור אופנים זוגיים: $\underbrace{ap}_y = \underbrace{aq}_x \tan(\underbrace{aq}_x)$
 עבור אופנים אי-זוגיים: $\underbrace{ap}_y = -\underbrace{aq}_x \cot(\underbrace{aq}_x)$
 משוואת מעגל: $\underbrace{(ap)^2}_y + \underbrace{(aq)^2}_x = v^2$

האופן הגבוה ביותר: $M = \left\lfloor \frac{2v}{\pi} \right\rfloor$
 מספר האופנים: $N = M + 1 = \left\lfloor \frac{4a\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda_0} \right\rfloor + 1$
 מקדם התפשטות מנורמל, קשר בין b ל v :
 $\sqrt{1-b} \tan(\sqrt{1-b} \cdot v) = \sqrt{b}$, $b = \frac{(ap)^2}{v^2} = \frac{n_{eff}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$
 זווית הפגיעה, מקדמי התפשטות:
 $\sin \theta_i = \frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}}$, $k_z \equiv \beta = k_0 n_2$, $k_x \equiv q = k_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

בתדירות קטעון עבור אופן m :
 תנאי הקטעון עבור האופן m : $2ak_{0cut-off} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = m\pi$, $m = 0, 1, 2, \dots$
 $p = 0 \Rightarrow \beta = n_2 k_0 \Rightarrow q^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) = \frac{v^2}{a^2}$
 $\tan(2v) = 0$, $\sin \theta_i = \sin \theta_c$
 עבור פרוסה דיאלקטרית סימטרית ($m=0$) תמיד מתקיים.

מקדם כליאה בפרוסה דיאלקטרית סימטרית: $\Gamma \equiv \frac{\int_{-a}^a \text{Re}(E_y H_x^*) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}(E_y H_x^*) dx} = 1 - \frac{\cos^2 aq}{1 + ap}$