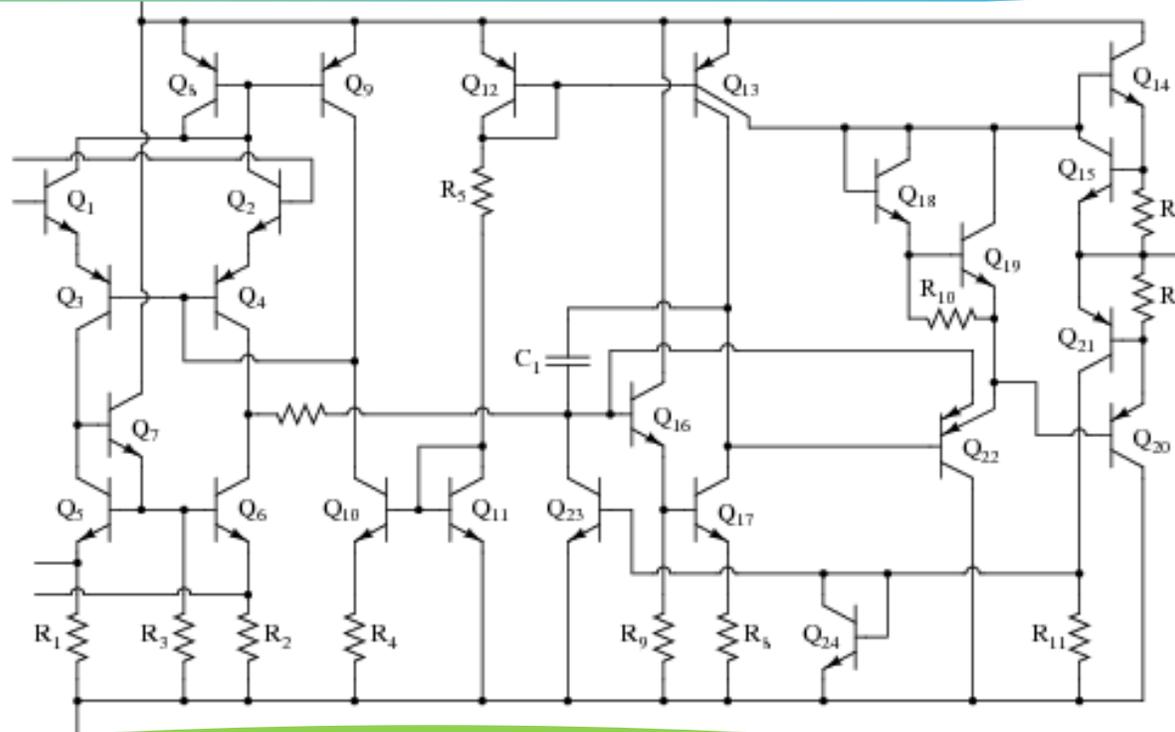


# Analog Electronics (Electronics III)

By: M. Shahraki

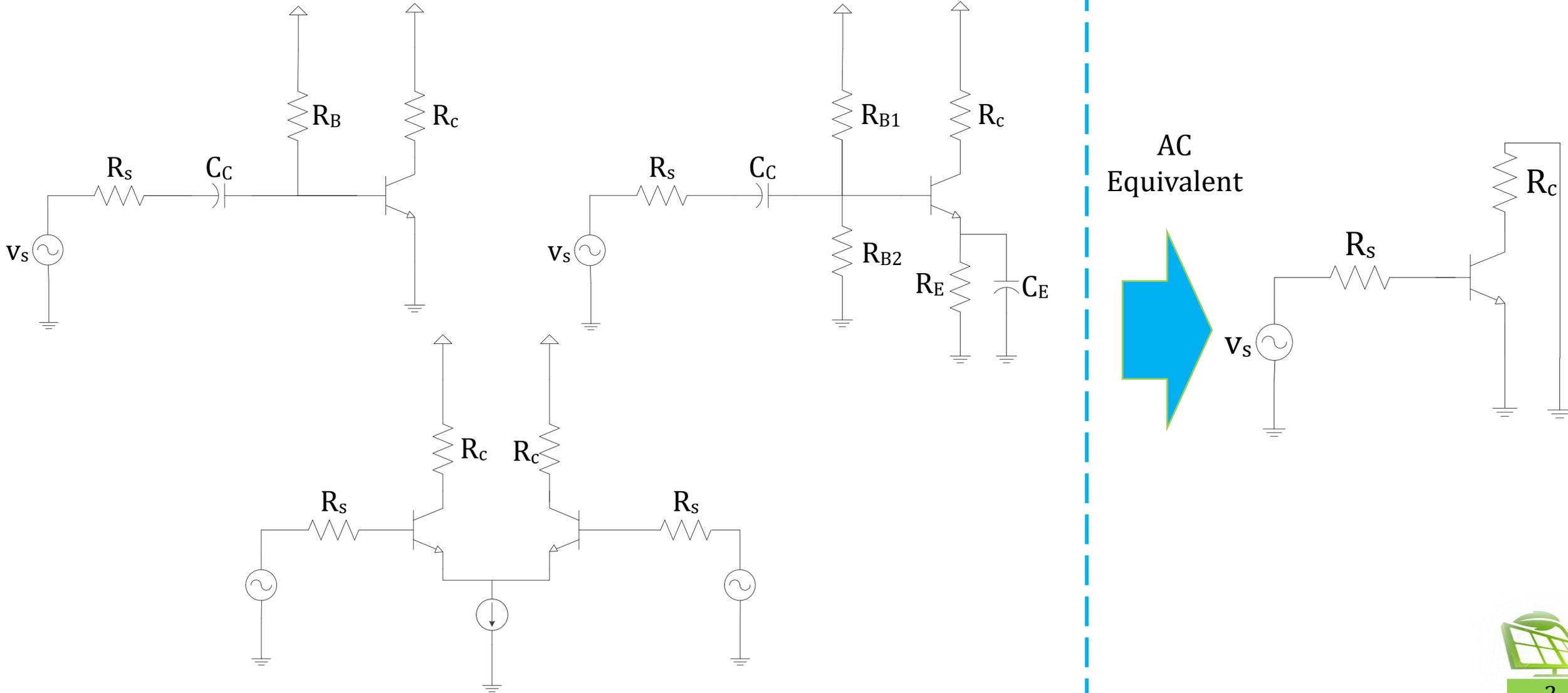


University of  
Sistan and Baluchestan

University of Sistan & Baluchestan  
Faculty of Electrical and Computer Engineering  
Department of Electrical & Electronics Engineering

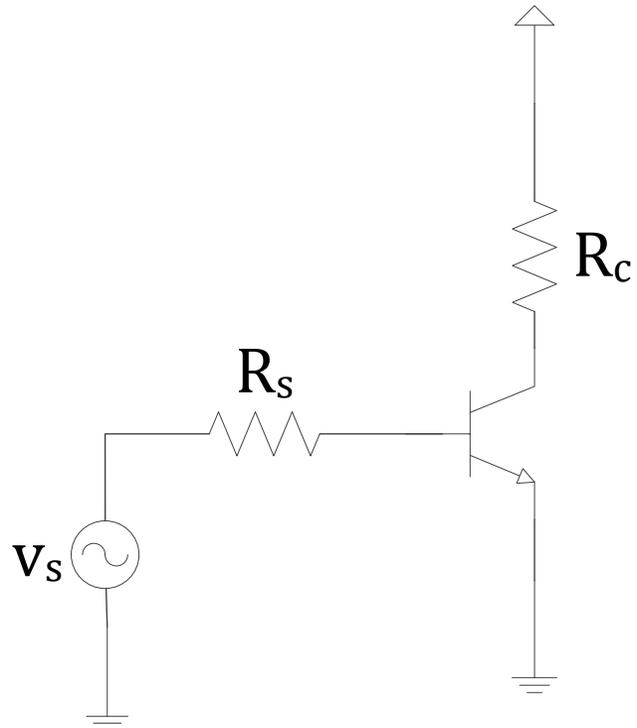
# Bias Circuits of Bipolar Transistors

مدارهای بایاس ترانزیستور دوقطبی



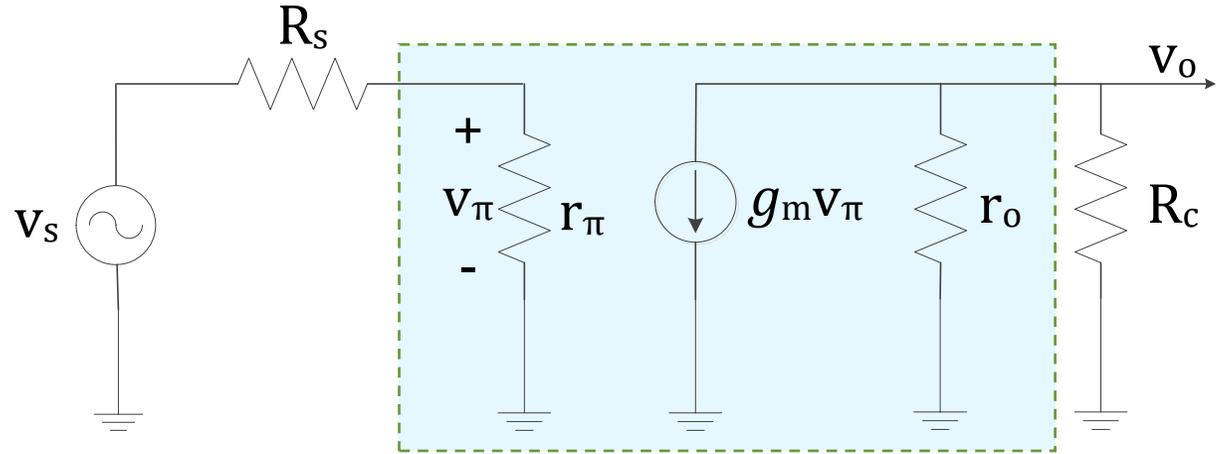
# Bipolar Transistors in Middle Frequencies

ترانزیستور دوقطبی در فرکانس های میانی



Hybrid  $\pi$  Equivalent

$\pi$  مدار معادل



$$A_{v0} = -\frac{R(\text{in Collector})}{R(\text{in Emitter})} = -\frac{r_o \parallel R_c}{(R_s + r_\pi) / \beta}$$

$$A_{v0} = \frac{v_o}{v_s} = -g_m (r_o \parallel R_c) \frac{r_\pi}{R_s + r_\pi}$$

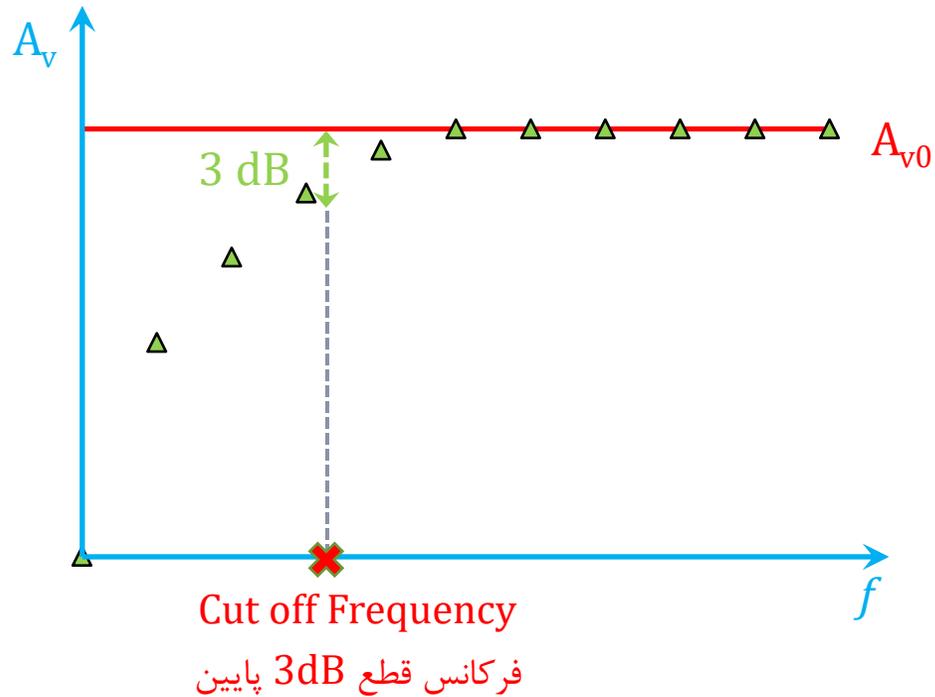
$$\beta = g_m r_\pi \quad A_{v0} = -g_m (r_o \parallel R_c) \frac{r_\pi}{R_s + r_\pi}$$

$$r_o \gg R_c \quad R_s \ll r_\pi \quad A_{v0} = -g_m R_c$$

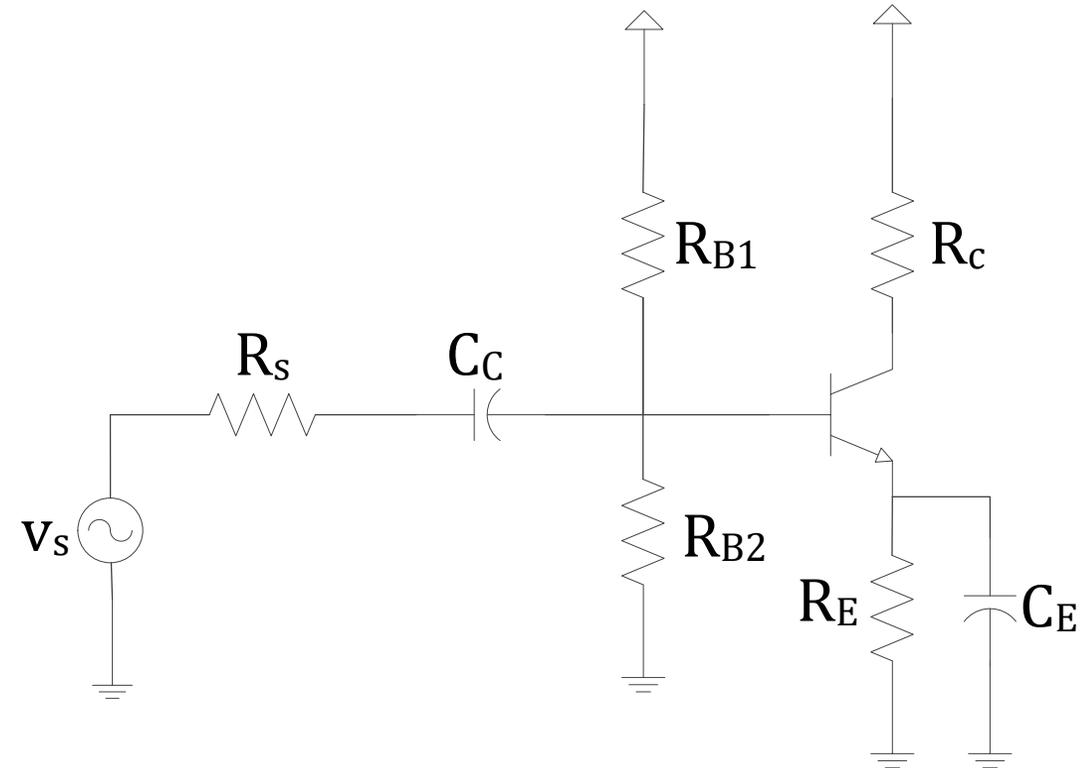


# Low Frequency Elements of Bipolar Transistors

مولفه‌های فرکانس پایین ترانزیستور دوقطبی



در مدارهای مجتمع مدرن به دلیل حجم بالای خازنهای کوپلاژ و بای پس از چنین مدارهای بایاسی استفاده نمی شود. مشکل فرکانس قطع پایین در این مدارها نیز وجود ندارد.



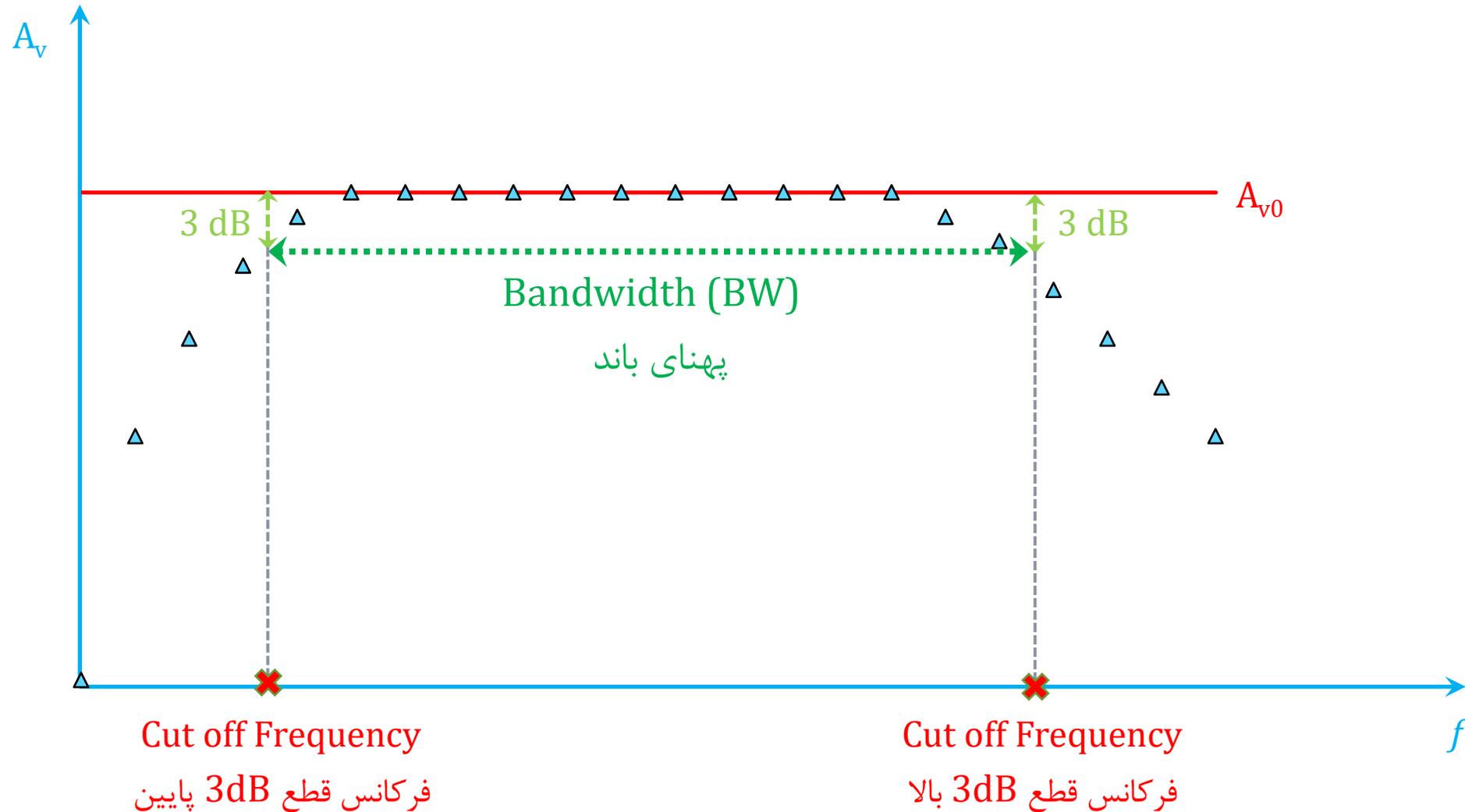
$C_c$  and  $C_E$  are not Completely Short Circuited in Low Frequencies

$$Z = \frac{1}{sC_c}$$



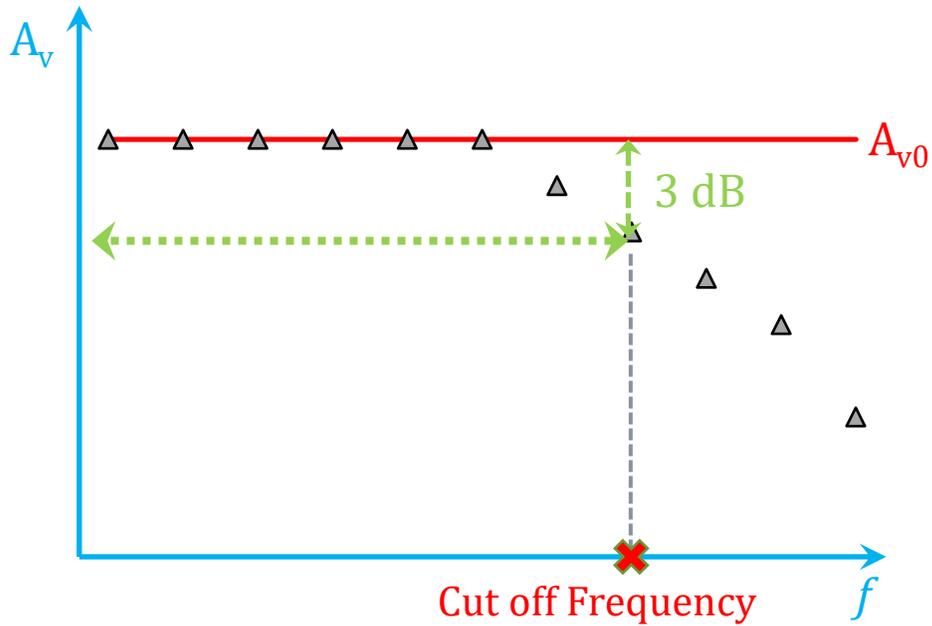
# High Frequency Elements of Bipolar Transistors

مولفه‌های فرکانس بالای ترانزیستور دوقطبی



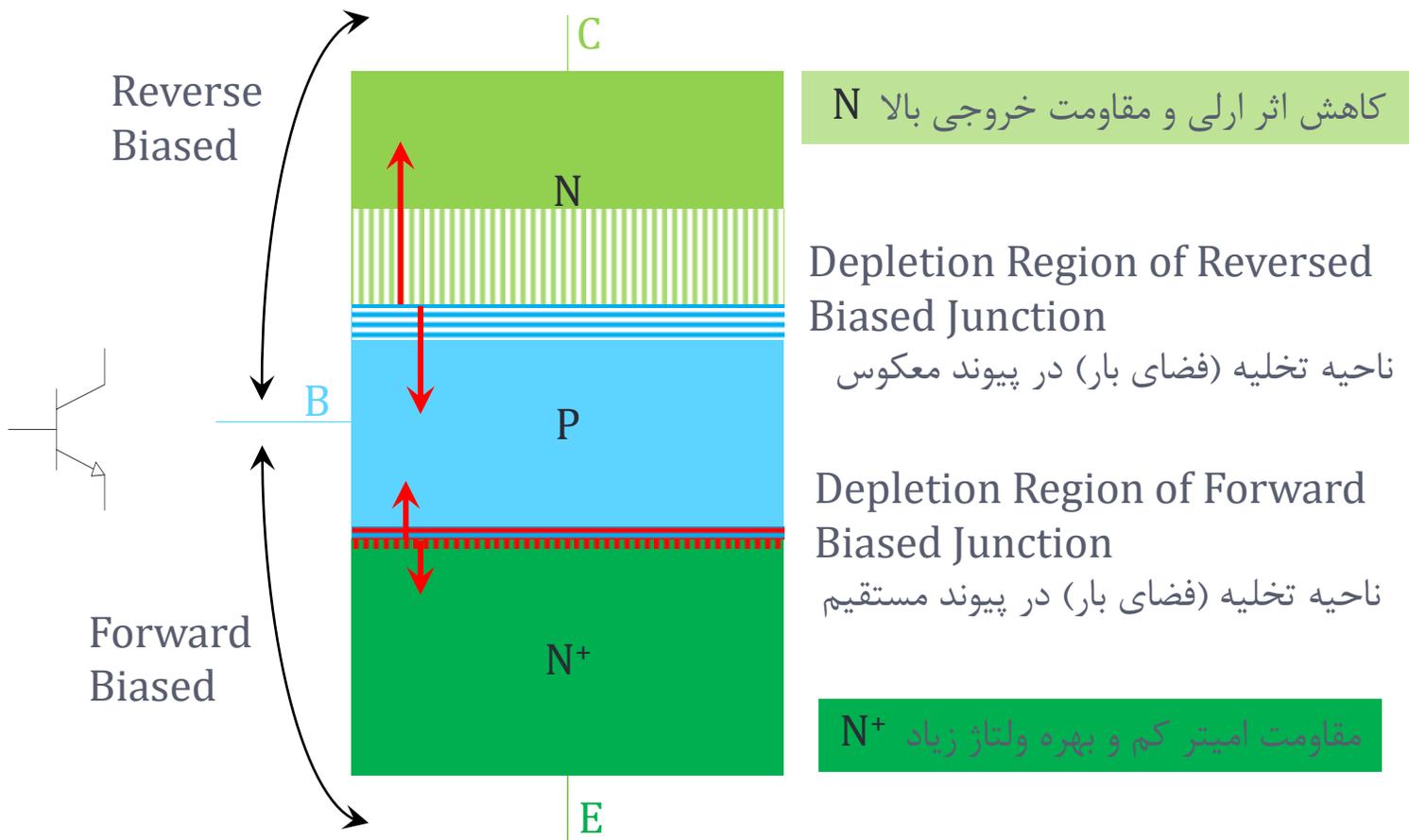
# High Frequency Elements of Bipolar Transistors

مولفه‌های فرکانس بالای ترانزیستور دوقطبی



Hybrid  $\pi$  Equivalent is Defected!

مدار معادل  $\pi$  کامل نیست!



Depletion region is an Insulator that is surrounded by charged plates

هر ناحیه تخلیه، همچون عایقی است که با صفحات باردار احاطه شده است

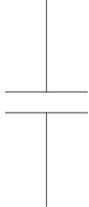
Two Capacitors

دو خازن

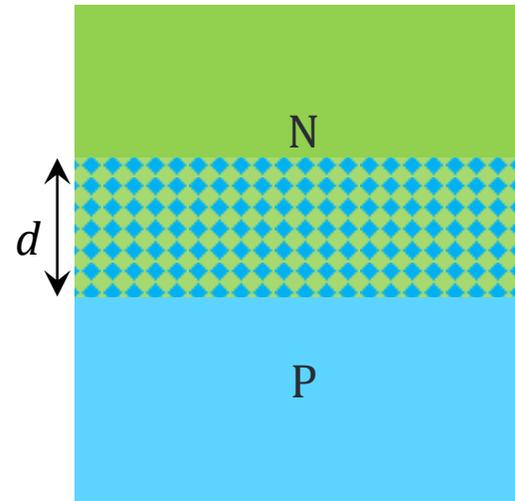


# High Frequency Elements of Bipolar Transistors

مولفه‌های فرکانس بالای ترانزیستور دوقطبی

Capacitor   $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} A$   
 خازن

- $\epsilon_0$  : Electric Constant ( $\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12}$  F/m)
- $\epsilon_r$  : Relative Permittivity (Dielectric Constant)
- $A$  : Area of the plates
- $d$  : Separation between the plates



$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_j}{V_b}\right)^m}$$

$C_{j0}$  : Junction Capacitance at Zero Bias

$V_j$  : Reverse Bias Voltage of Junction

$$V_b = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \approx 0.8V$$

$m \sim 0.33-0.5$

Depending on the Junction Type



# High Frequency Elements of Bipolar Transistors

مولفه‌های فرکانس بالای ترانزیستور دوقطبی

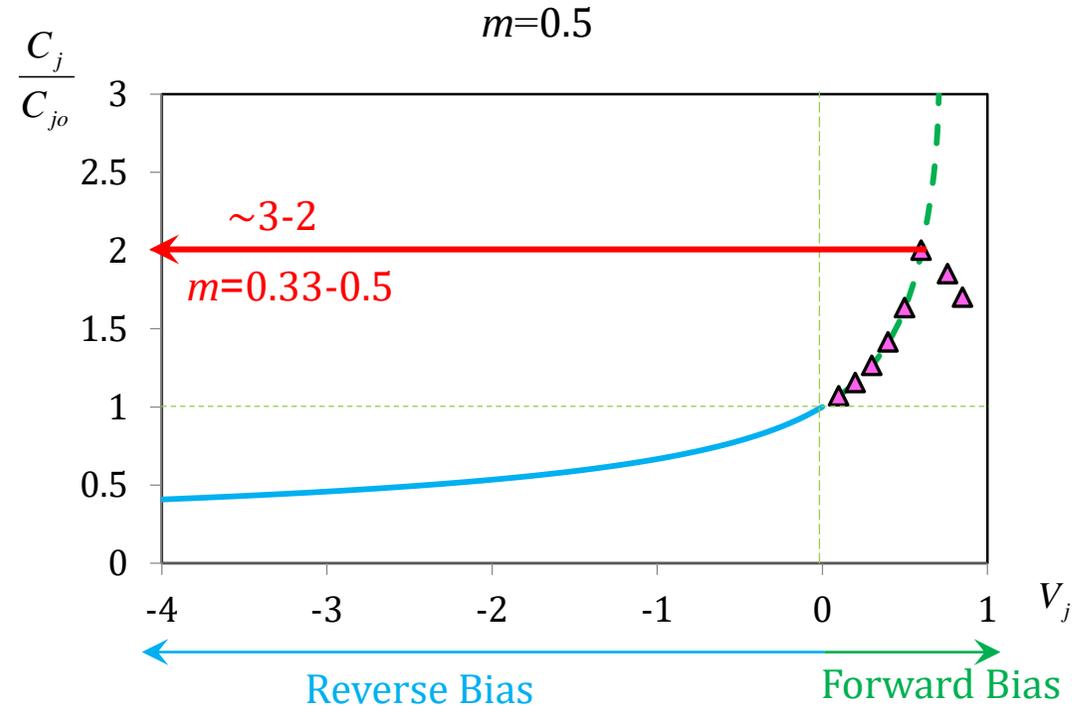
$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_j}{V_b}\right)^m}$$

2N3055  
MJ2955  $\rightarrow C_{j0} \approx 200 \text{ pF}$

BC107  
BC109  $\rightarrow C_{j0} \approx 10 \text{ pF}$

IC  $\rightarrow C_{j0} \approx 10 - 100 \text{ fF}$

Higher Bandwidths



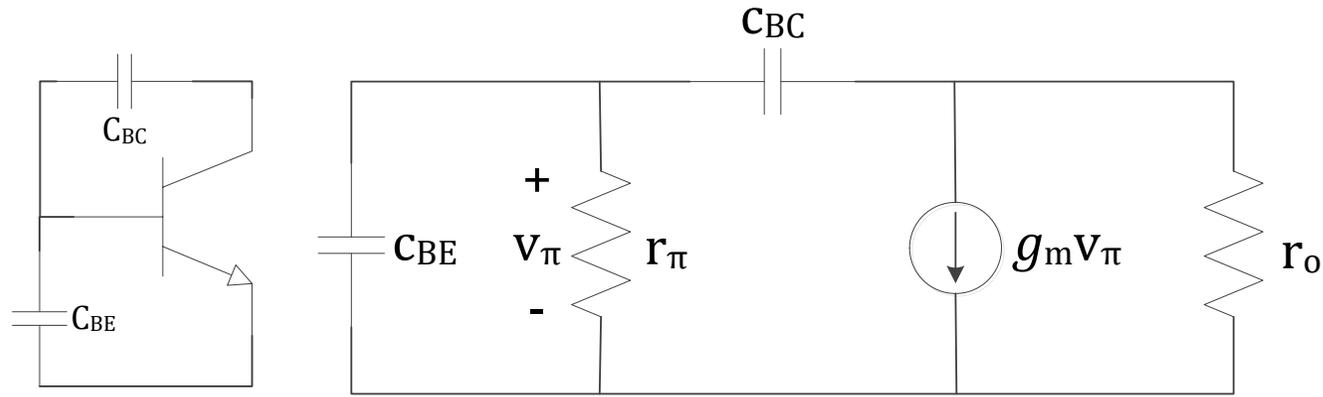
$I_c$  is increased  $\rightarrow$   
MIM structure is no longer valid

$$C_{jRB} < C_{jFB}$$



# High Frequency Elements of Bipolar Transistors

مولفه‌های فرکانس بالای ترانزیستور دوقطبی



$$C_{BC} = C_{jc}$$

$$C_{jc} = \frac{C_{jco}}{\left(1 + \frac{V_{CB}}{V_{b1}}\right)^m}$$

$C_{jco}$ : Junction Capacitance at Zero Voltage

$$V_{b1} = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) : \text{Junction Potential}$$

$$m \sim 0.33$$

$$C_{BE} = C_{je} + C_d$$

$$C_{je} \approx 2C_{jeo} - 3C_{jeo}$$

$C_d$ : diffusion Capacitance

مربوط به زمان موردنیاز برای نفوذ حامل‌های اقلیت در بیس است. فقط در ترانزیستور دوقطبی و در «بایاس مستقیم» وجود دارد. تاخیر ایجاد شده، رفتار خازنی ایجاد میکند که  $C_d$  رفتار آن را به شکل مناسبی پیش بینی می‌کند (خازن فیزیکی نیست)

$$C_d = \frac{Q_h}{v_\pi} \quad C_d = g_m \tau_F$$

$\tau_F$ : Forward Base Transit Time

$$\tau_F = \frac{w_B^2}{mD_n}$$

$w_B$ : Base width     $D_n$ : Diffusion constant

$$I_C \downarrow \quad C_d \downarrow$$

$$w_B \downarrow \quad C_d \downarrow$$



# High Frequency Elements of Bipolar Transistors

مولفه‌های فرکانس بالای ترانزیستور دوقطبی

$$C_d = g_m \tau_F \quad \tau_F = \frac{w_B^2}{mD_n}$$

BC107  
BC109  $\rightarrow w_B \approx 1 \mu m, \tau_F = 0.5 ns$

$I_C = 0.1 \text{ mA}$	$I_C = 1 \text{ mA}$	$I_C = 10 \text{ mA}$
$C_d = 2 \text{ pF}$	$C_d = 20 \text{ pF}$	$C_d = 200 \text{ pF}$

IC  $\rightarrow w_B \approx 10 \mu m, \tau_F = 10 ps$

$C_d = 20 \text{ fF}$	$C_d = 200 \text{ fF}$	$C_d = 2000 \text{ fF}$
-----------------------	------------------------	-------------------------

$C_d$  is increased But The overall  
Bandwidth would be increased!?!?

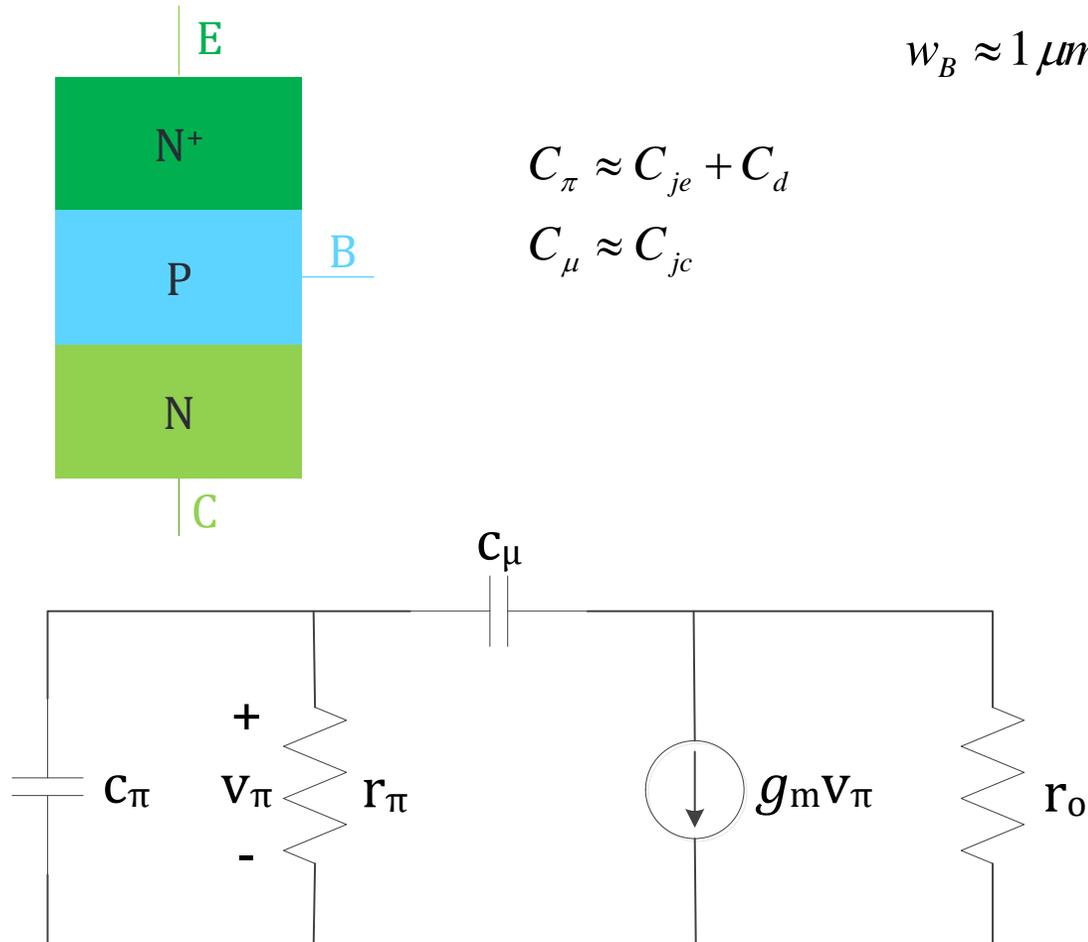
عوامل موثر دیگری نیز وجود دارند.



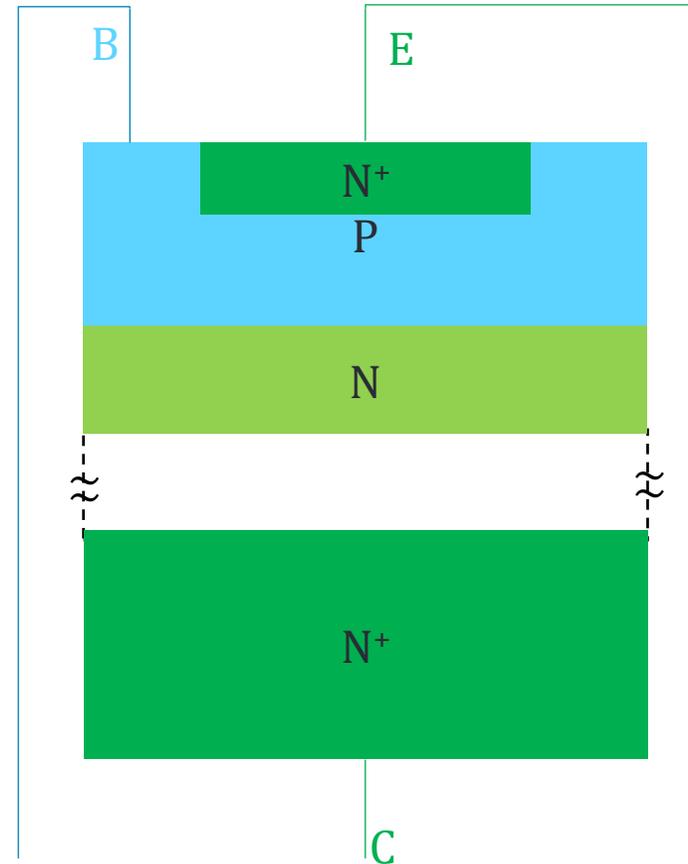
# High Frequency Elements of Bipolar Transistors

مولفه‌های فرکانس بالای ترانزیستور دوقطبی

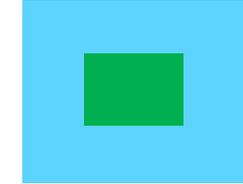
## Simplified Mode of Transistor



## Actual Discrete Transistor



## Top View



Collector Must Be Thick as a Foundation

به عنوان پایه، کلکتور باید ضخیم باشد

For Reducing The Series Resistance, Most of The Collector Is Constructed as N<sup>+</sup>

برای کاهش مقاومت سری، بیشتر فضای کلکتور از جنس N<sup>+</sup> است

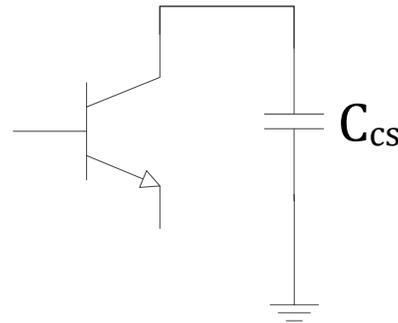


# High Frequency Elements of Bipolar Transistors

مولفه‌های فرکانس بالای ترانزیستور دوقطبی

Integrated Circuit Transistor

All Terminals Must be Accessible



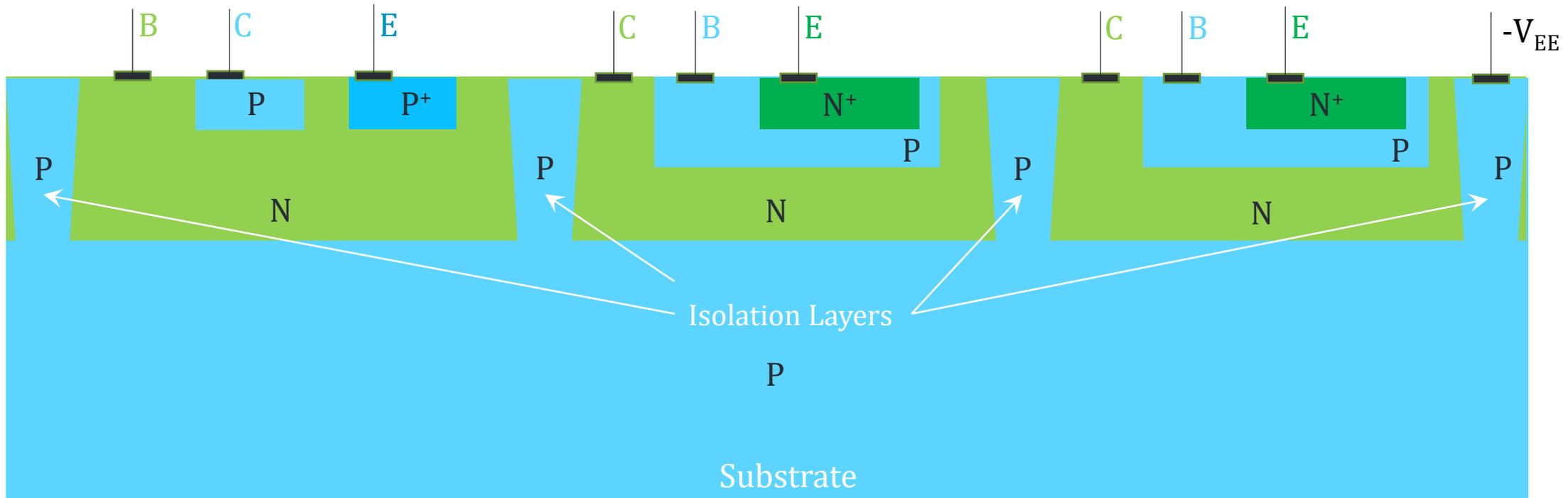
$$C_{sub} \triangleq C_{cs}$$

New capacitance between sub. and collector is added

So this Diode can be considered to be Off

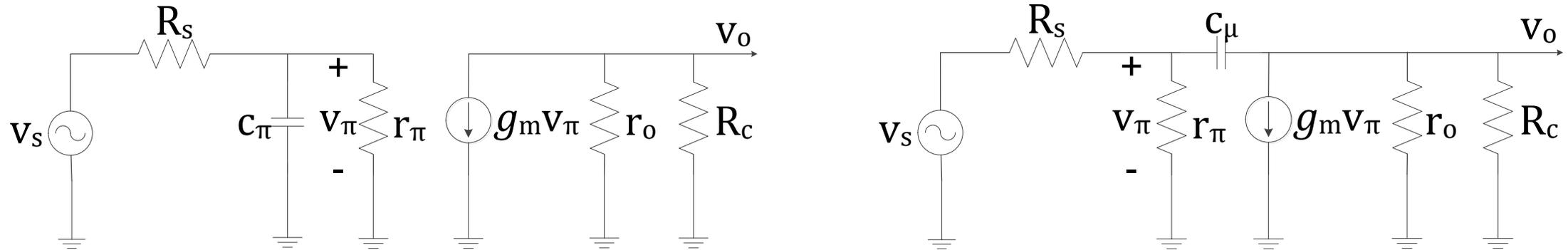
Collector is Reversed Biased to Substrate

Lateral PNP



# Determine the Number of Poles and Zeros

تعیین تعداد صفر و قطبهای مدار



Number of Poles = Number of Capacitors – Capacitance Loops

تعداد قطبهای مدار = تعداد خازنهای مدار - حلقه های خازنی

Number of Zeros = Number of Capacitors Between Input and Output – Capacitance Loops

تعداد صفرهای مدار = تعداد خازنهای در مسیر ورودی به خروجی - حلقه های خازنی در این مسیر

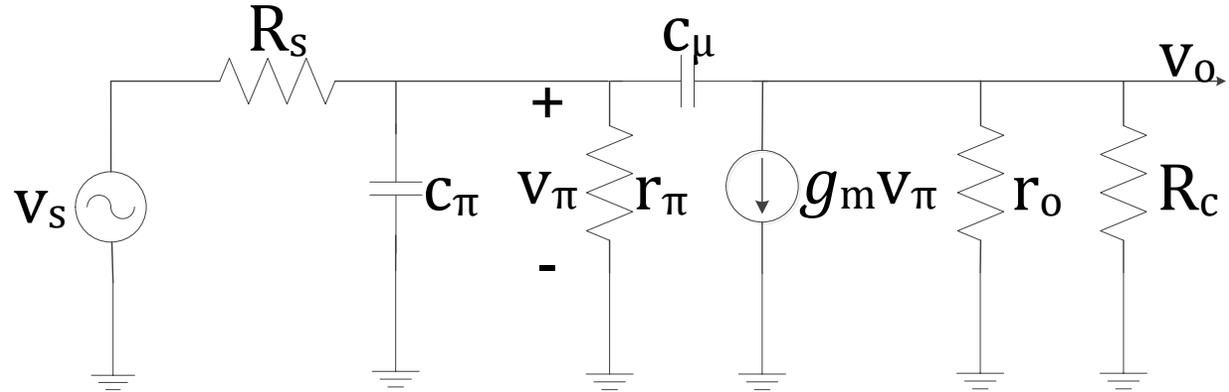
مسیر بین ورودی و خروجی می تواند از طریق منابع وابسته ایجاد شود.

مسیر بین ورودی و یک متغیر از منابع وابسته در خروجی وجود داشته باشد. (مثل خازن بای پس)



# Determine the Number of Poles and Zeros

تعیین تعداد صفر و قطبهای مدار



Number of Poles = Number of Capacitors (2) – Capacitance Loops (0)

تعداد قطبهای مدار = ۲

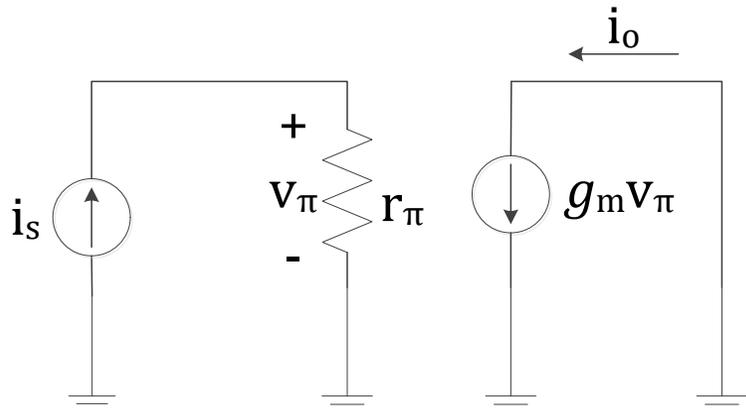
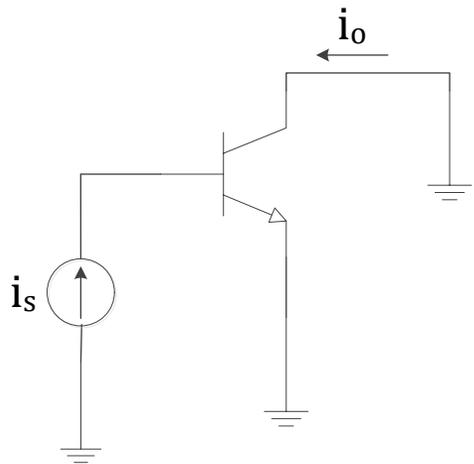
Number of Zeros = Number of Capacitors Between Input and Output (1) – Capacitance Loops (0)

تعداد صفرهای مدار = ۱

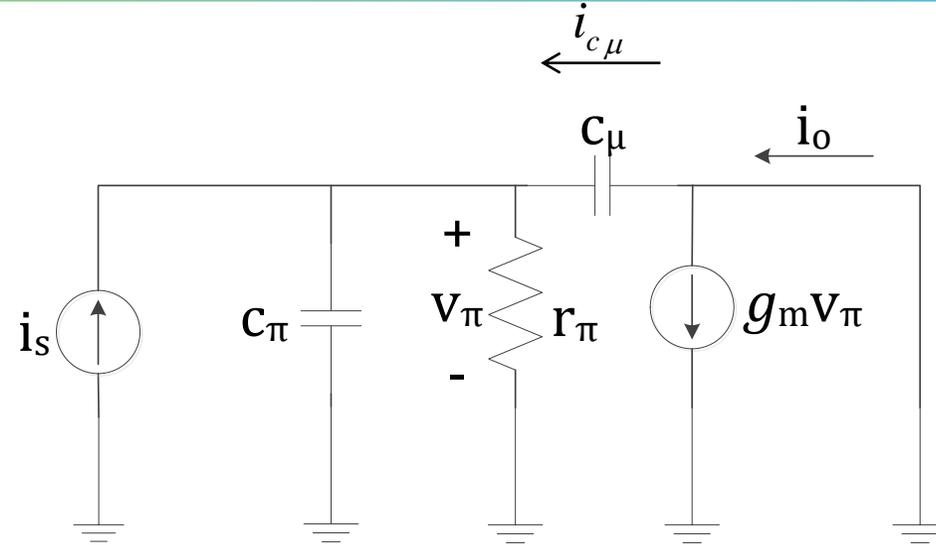


# Figure of Merits For Bipolar Transistors

تعریف معیارهای بررسی ترانزیستور دوقطبی



$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{i_o}{v_\pi} \frac{v_\pi}{i_s} = g_m r_\pi = \beta_0$$

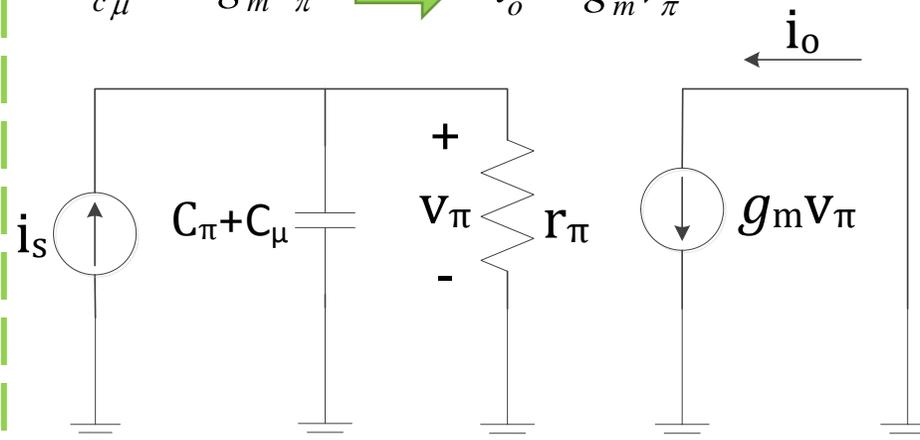


Number of Poles=1

Number of Zeros=1

$$c_\pi \parallel c_\mu$$

$$i_{c\mu} \ll g_m v_\pi \rightarrow i_o \approx g_m v_\pi$$



$$v_\pi = i_s \left( r_\pi \parallel \frac{1}{s(c_\pi + c_\mu)} \right)$$

$$\frac{i_o}{i_s} = g_m \left( r_\pi \parallel \frac{1}{s(c_\pi + c_\mu)} \right)$$

$$\frac{i_o}{i_s} = g_m \frac{r_\pi}{r_\pi (c_\pi + c_\mu)s + 1}$$

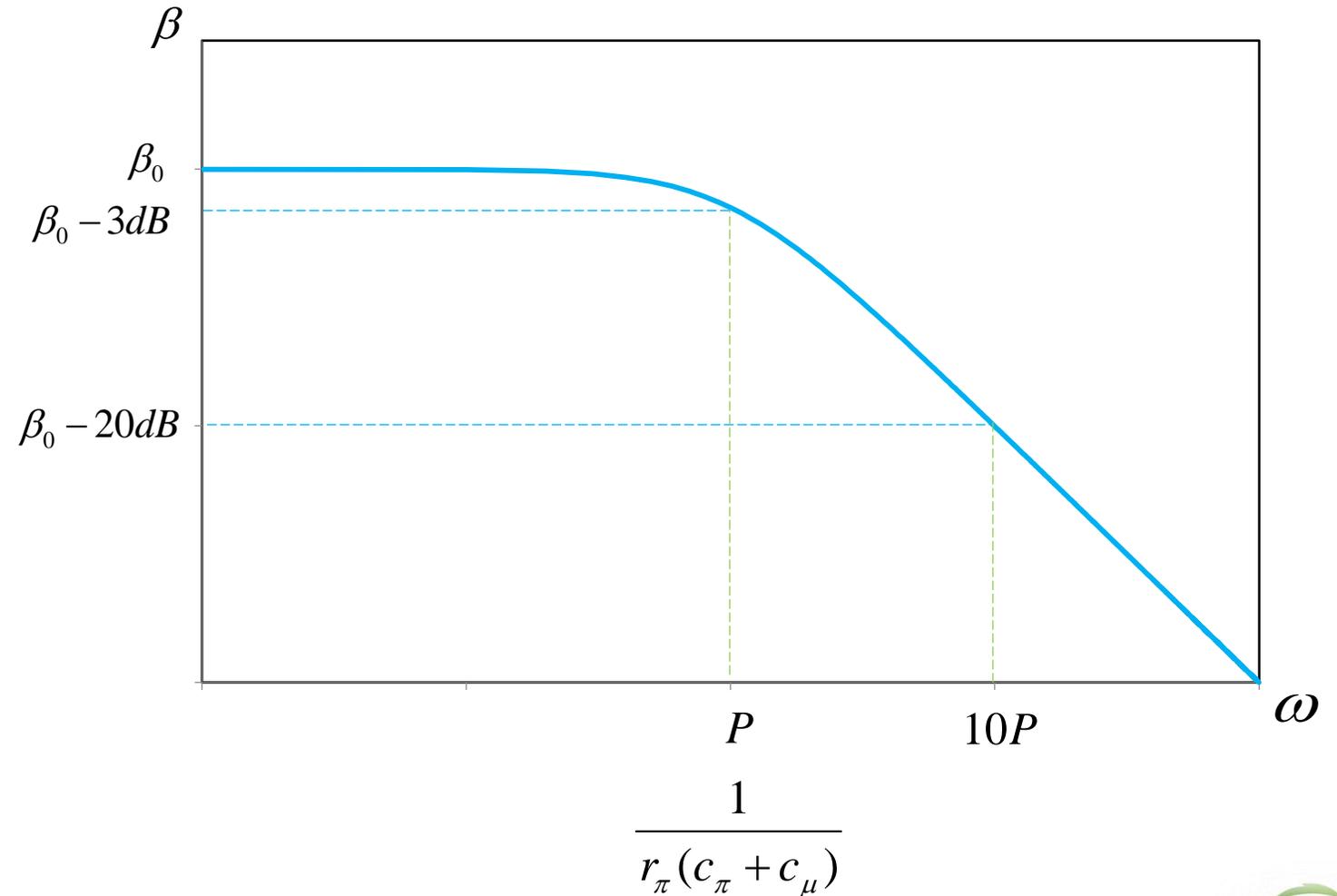


# Figure of Merits For Bipolar Transistors

تعریف معیارهای بررسی ترانزیستور دوقطبی

$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{g_m r_\pi}{r_\pi (c_\pi + c_\mu) S + 1} = \frac{\beta_0}{r_\pi (c_\pi + c_\mu) S + 1}$$

$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{A_0}{\frac{S}{P} + 1} \quad P = \frac{1}{r_\pi (c_\pi + c_\mu)}$$

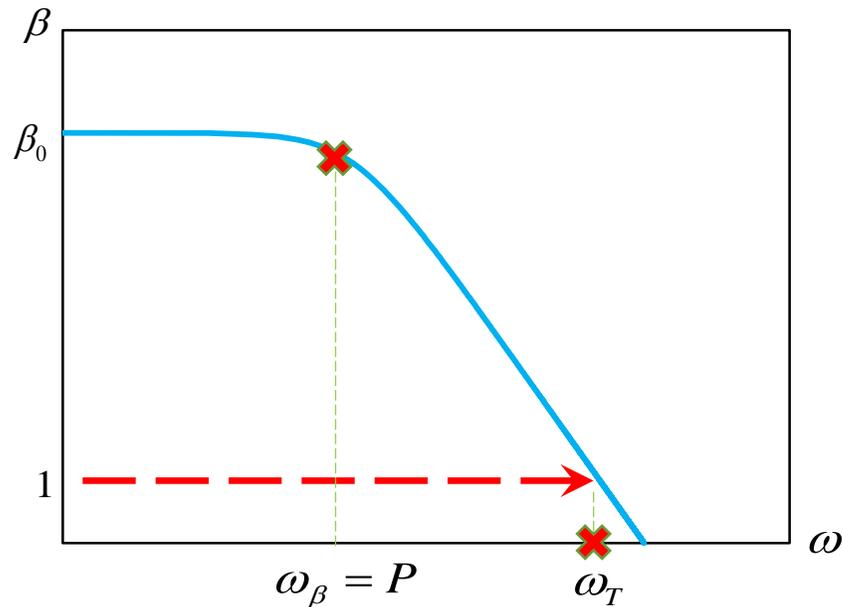


# Figure of Merits For Bipolar Transistors

تعریف معیارهای بررسی ترانزیستور دوقطبی

$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{g_m r_\pi}{r_\pi (c_\pi + c_\mu) S + 1} = \frac{\beta_0}{r_\pi (c_\pi + c_\mu) S + 1}$$

$$\frac{i_o}{i_s} = \frac{\beta_0}{\frac{S}{P} + 1} \quad P = \frac{1}{r_\pi (c_\pi + c_\mu)}$$



$$\beta = \frac{i_o}{i_s} \quad |\beta| = 1 \xrightarrow{\text{No Amplification}} \omega_T \quad \text{Transition Frequency (Angular)}$$

فرکانس گذر

$$\frac{\beta_0}{\sqrt{\left(\frac{\omega_T}{P}\right)^2 + 1}} = 1 \quad \beta_0^2 = \left(\frac{\omega_T}{P}\right)^2 + 1 \quad \omega_T = P\sqrt{\beta_0^2 - 1} \approx P\beta_0$$

$$\text{Gain.BW} = \text{Cte} \quad \beta_0.P = 1.\omega_T$$

$$\omega_T = \frac{\beta_0}{r_\pi (c_\pi + c_\mu)} = \frac{g_m}{c_\pi + c_\mu}$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(c_\pi + c_\mu)}$$

معیار برای حدود فرکانسی قابل استفاده ترانزیستور

$$\omega_\beta = \frac{1}{r_\pi (c_\pi + c_\mu)}$$

$$\omega_T = \beta_0 \omega_\beta$$

$$f_T = \beta_0 f_\beta$$

↑ ↓



# Figure of Merits For Bipolar Transistors

تعریف معیارهای بررسی ترانزیستور دوقطبی

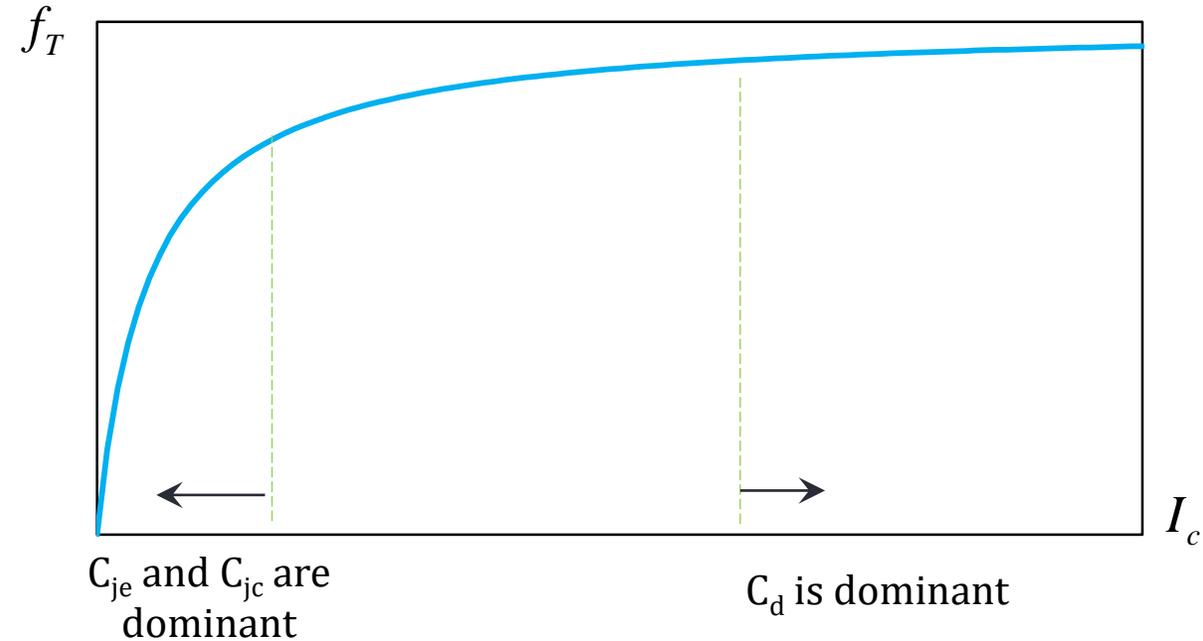
$$\omega_T = \frac{g_m}{C_\pi + C_\mu} \quad \tau_T = \frac{1}{\omega_T} \quad \text{Transition Time} \quad \text{زمان گذر}$$

$$\tau_T = \frac{1}{\omega_T} = \frac{C_\mu + C_\pi}{g_m} = \frac{C_\mu + C_{je} + C_d}{g_m} = \frac{C_\mu + C_{je} + g_m \tau_F}{g_m}$$

$$\tau_T = \left( \frac{C_\mu + C_{je}}{g_m} \right) + \tau_F$$

$$I_c \downarrow \quad g_m \downarrow \longrightarrow \tau_T \cong \left( \frac{C_\mu + C_{je}}{g_m} \right)$$

$$I_c \uparrow \quad g_m \uparrow \longrightarrow \tau_T \cong \tau_F$$



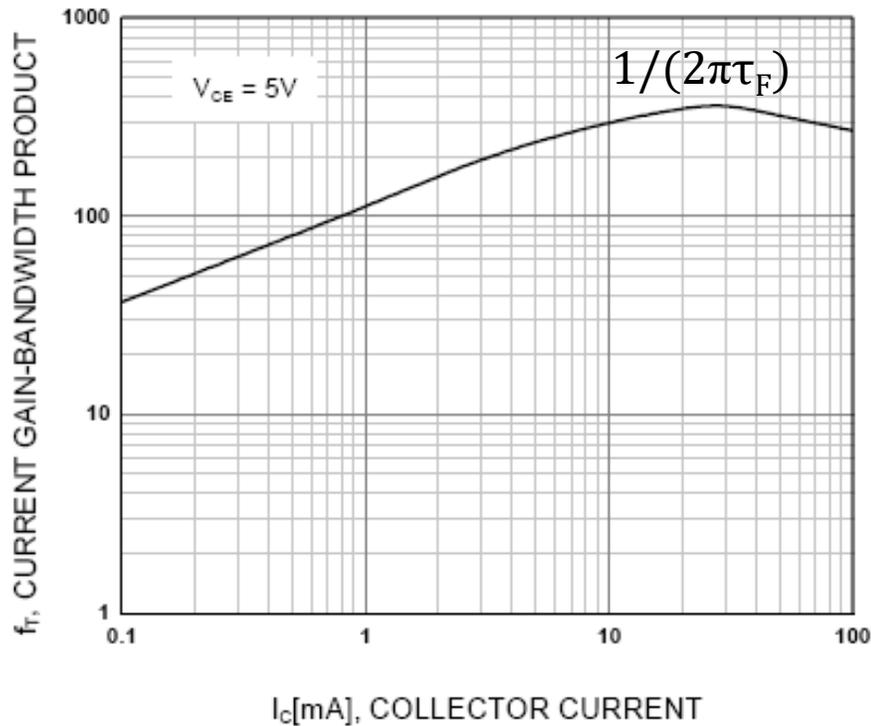
افزایش جریان سبب بهبود فرکانس گذر شده  
تا جایی که به اشباع رسیده و به  $1/(2\pi\tau_F)$  محدود میشود



# Figure of Merits For Bipolar Transistors

تعریف معیارهای بررسی ترانزیستور دوقطبی

The real Graph ( $f_T$  vs.  $I_C$ )



In High Injection Region:  
Transistor Specifications Are Degraded

Example:

$$C_{jco} = 5 \text{ pF}, \quad C_{je0} = 5 \text{ pF}, \quad \tau_F = 0.5 \text{ ns}$$

$$\text{Active Region: } C_{je} \approx 2C_{je0}, \quad C_{jc} \approx C_{jco}$$

$$\tau_T = \left( \frac{C_{jc} + C_{je}}{g_m} \right) + \tau_F$$

$$\frac{1}{2\pi f_T} = \left( \frac{C_{jc} + C_{je}}{g_m} \right) + \tau_F$$

$$I_C = 10 \text{ } \mu\text{A:} \quad g_m = 0.4 \text{ m}\Omega \quad \tau_T = 37.5 \text{ ns} + 0.5 \text{ ns} \quad f_T = 4.18 \text{ MHz}$$

$$I_C = 1 \text{ mA:} \quad g_m = 40 \text{ m}\Omega \quad \tau_T = 0.375 \text{ ns} + 0.5 \text{ ns} \quad f_T = 181.9 \text{ MHz}$$

$$I_C = 100 \text{ mA:} \quad g_m = 4000 \text{ m}\Omega \quad \tau_T = 0.00375 \text{ ns} + 0.5 \text{ ns} \quad f_T = 315.9 \text{ MHz}$$

$$\frac{1}{2\pi f_{T(\max)}} = \tau_F \quad f_{T(\max)} = \frac{1}{2\pi\tau_F} = 318 \text{ MHz}$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

Effect of Poles تاثیر قطبها

$$A = A_0 \frac{1}{1 + \frac{S}{P}}$$

Amplitude: دامنه

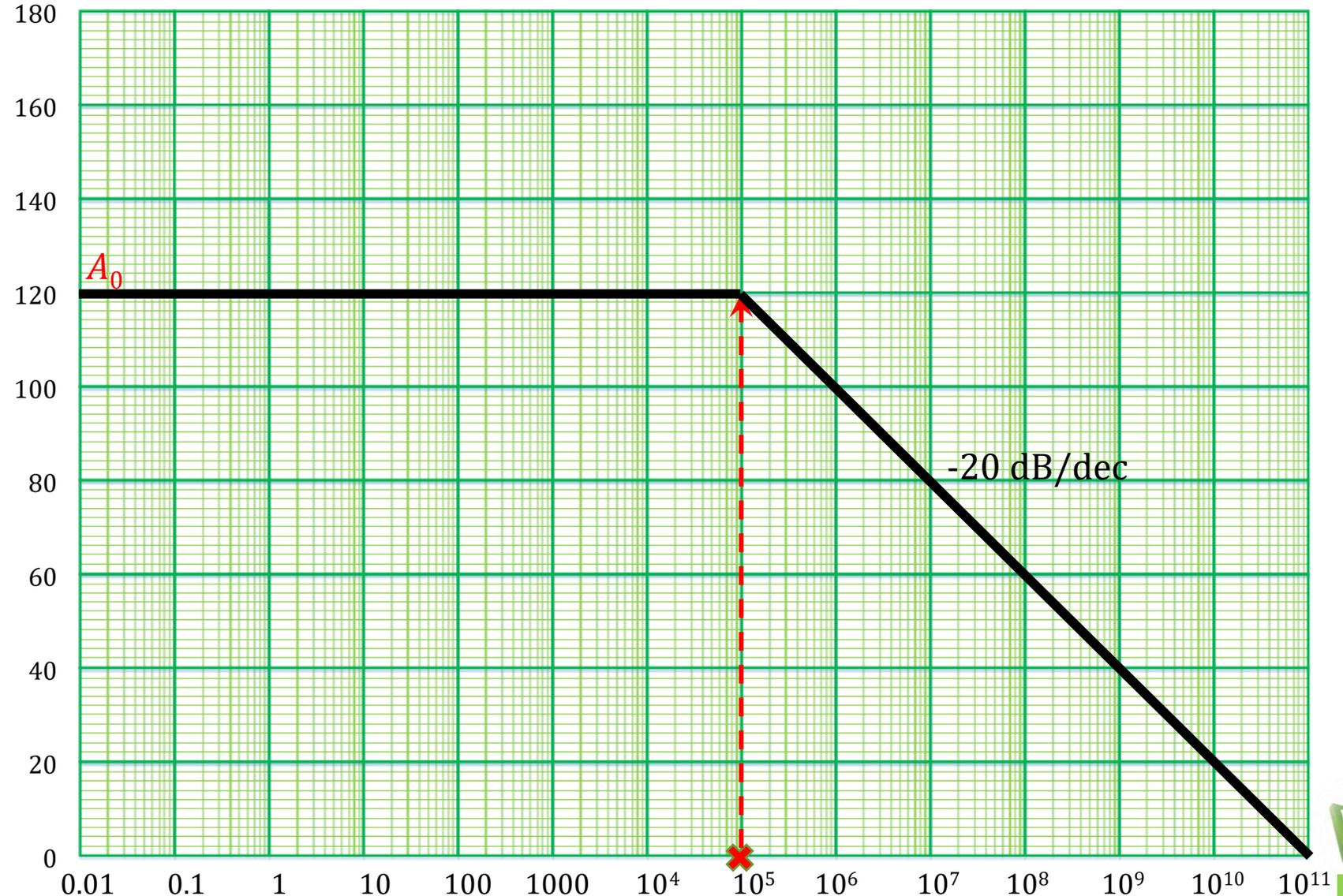
$20\text{Log}(A)$

$$P=10^5 \quad A_0=10^6 \triangleq 120 \text{ dB}$$

$$\omega=P \rightarrow |A| = \frac{|A_0|}{\sqrt{2}} \Rightarrow -3\text{dB}$$

$$\omega=10.P \rightarrow |A| \approx \frac{|A_0|}{10} \Rightarrow -20\text{dB}$$

$$\omega=100.P \rightarrow |A| \approx \frac{|A_0|}{100} \Rightarrow -40\text{dB}$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

Effect of Poles    تأثیر قطبها

$$A = A_0 \frac{1}{1 + \frac{S}{P}}$$

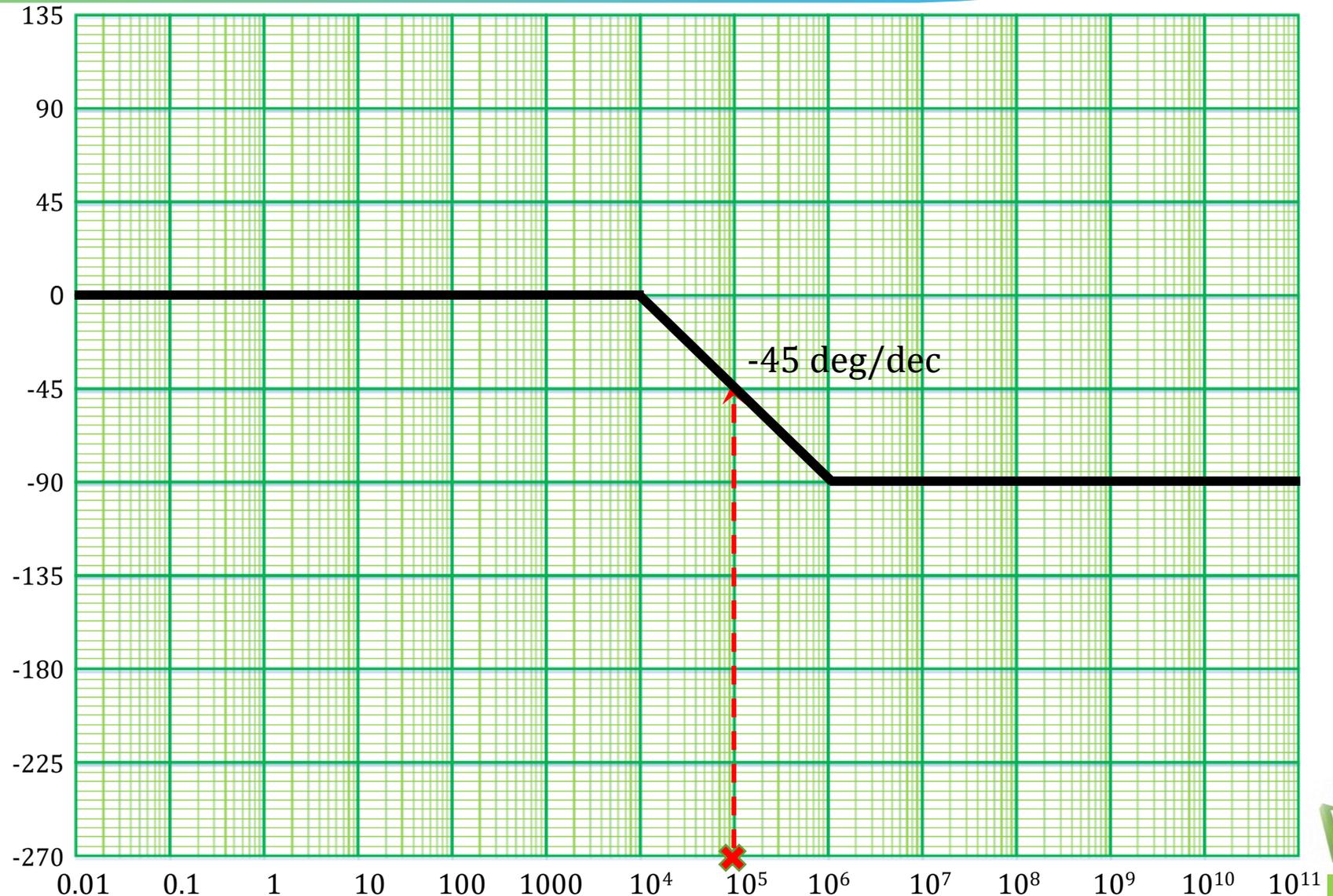
Phase: فاز  
 $-\arctan(\omega/p)$

$$P = 10^5$$

$$\omega = 0.1P \rightarrow \angle A = -\arctan(0.1) \cong 0$$

$$\omega = P \rightarrow \angle A = -\arctan(1) = -45$$

$$\omega = 10.P \rightarrow \angle A = -\arctan(10) \cong -90$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

Effect of Zeros تاثیر صفرها

$$A = A_0 \frac{1 + \frac{S}{Z}}{1}$$

Amplitude: دامنه

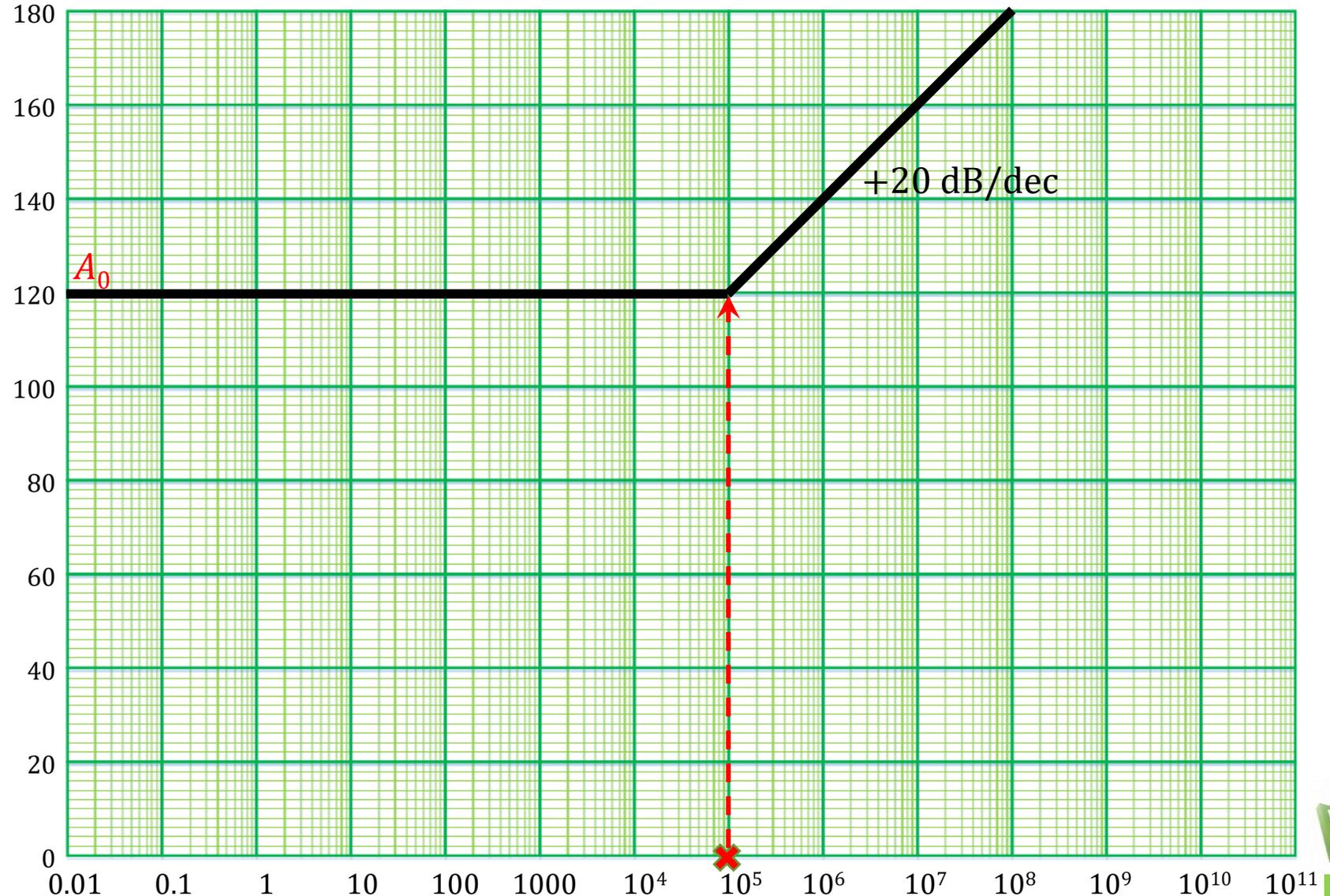
$$20\text{Log}(A)$$

$$Z=10^5 \quad A_0=10^6 \triangleq 120 \text{ dB}$$

$$\omega=Z \rightarrow |A| = \sqrt{2}|A_0| \Rightarrow +3\text{dB}$$

$$\omega=10.Z \rightarrow |A| \approx 10|A_0| \Rightarrow +20\text{dB}$$

$$\omega=100.Z \rightarrow |A| \approx 100|A_0| \Rightarrow +40\text{dB}$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

Effect of Zeros تاثیر صفرها

$$A = A_0 \frac{1 + \frac{S}{Z}}{1}$$

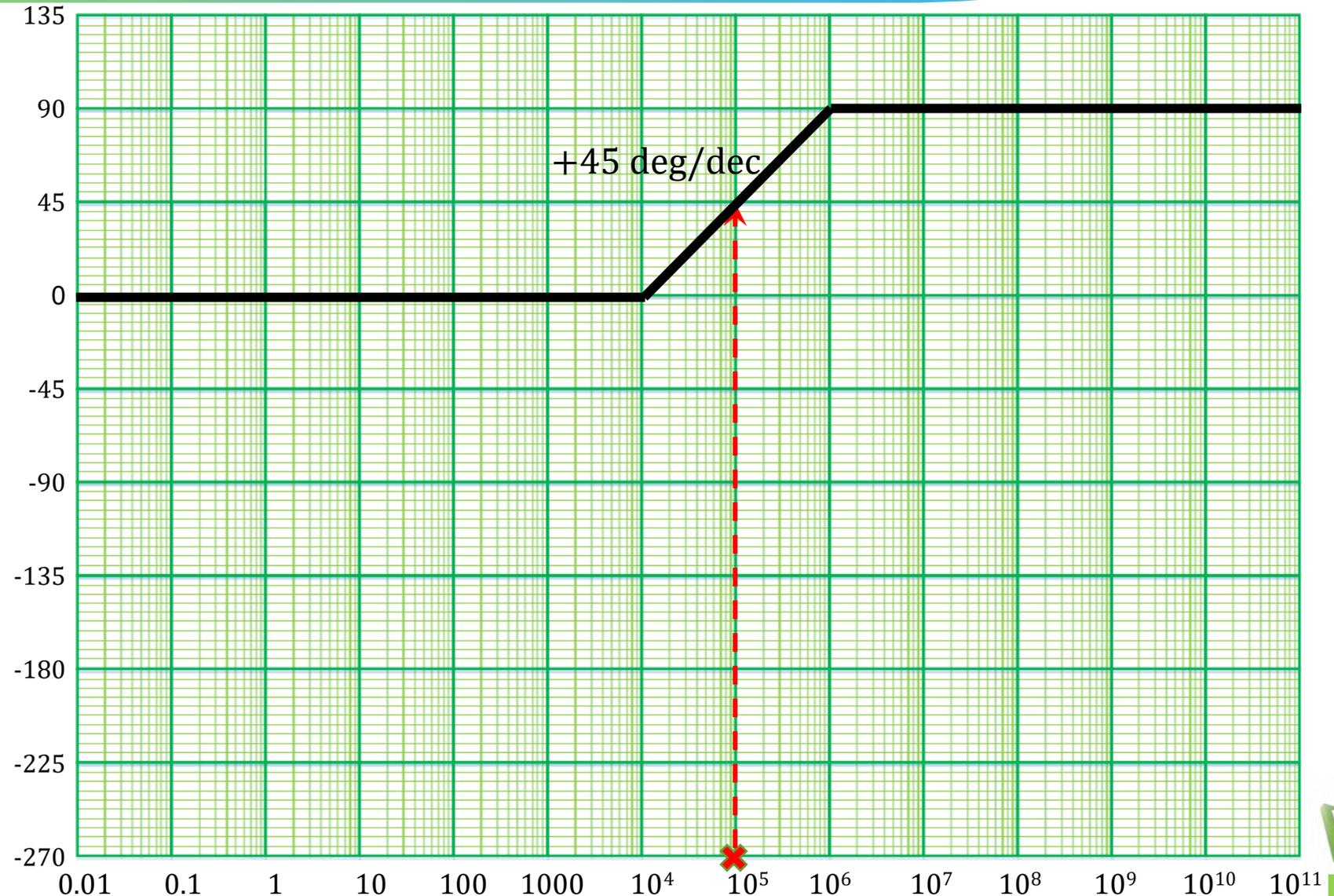
Phase: فاز  
 $\arctan(\omega/Z)$

$$Z = 10^5$$

$$\omega = 0.1Z \rightarrow \angle A = a \tan(0.1) \cong 0$$

$$\omega = Z \rightarrow \angle A = a \tan(1) \cong 45$$

$$\omega = 10Z \rightarrow \angle A = a \tan(10) \cong 90$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

Effect of Zeros On Right Half Plane    تاثیر صفرهای سمت راست محور

$$A = A_0 \frac{1 - \frac{S}{Z}}{1}$$

Amplitude: دامنه

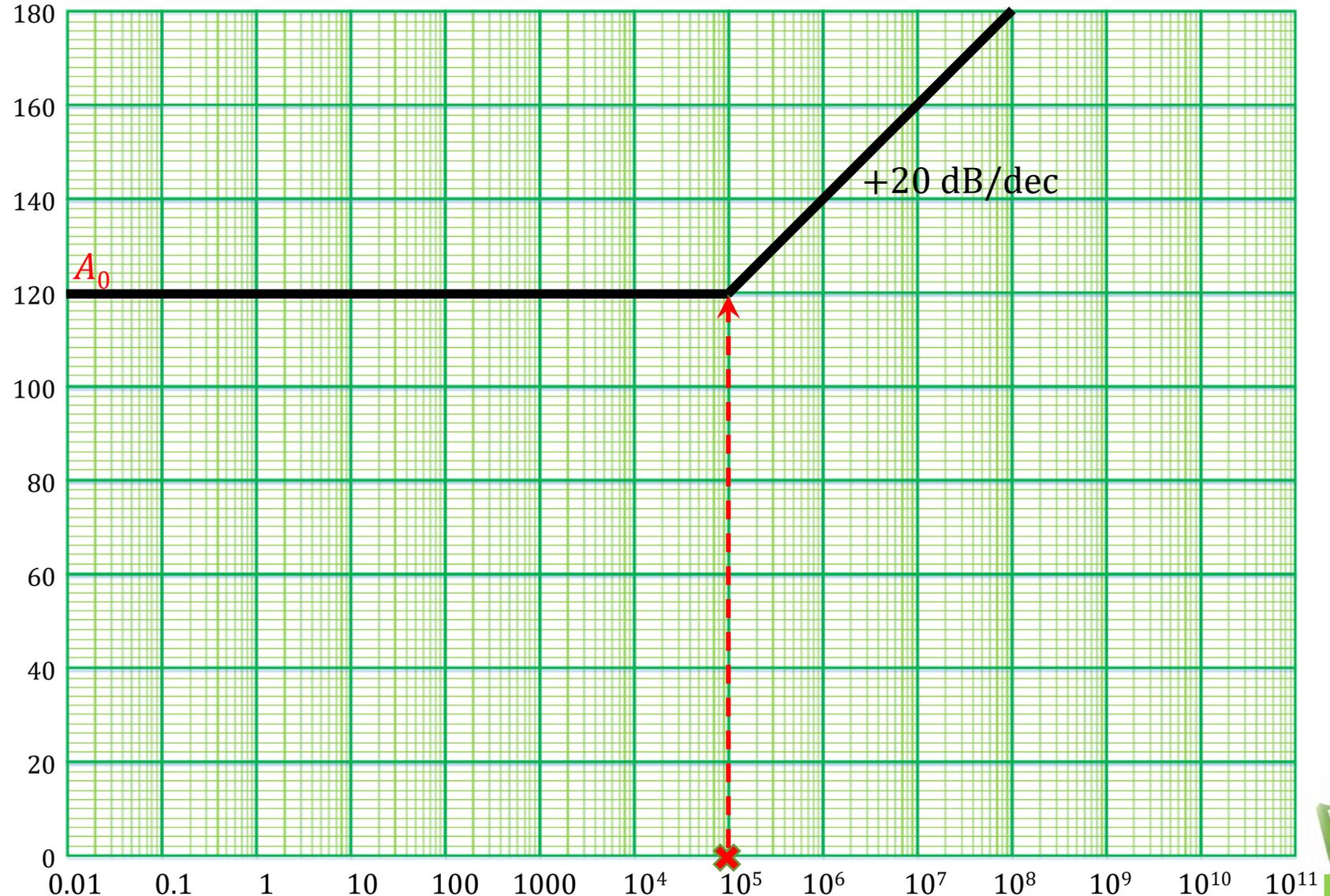
$$20\text{Log}(A)$$

$$Z=10^5 \quad A_0=10^6 \triangleq 120 \text{ dB}$$

$$\omega=Z \rightarrow |A| = \sqrt{2}|A_0| \Rightarrow +3\text{dB}$$

$$\omega=10.Z \rightarrow |A| \approx 10|A_0| \Rightarrow +20\text{dB}$$

$$\omega=100.Z \rightarrow |A| \approx 100|A_0| \Rightarrow +40\text{dB}$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

Effect of Zeros On Right Half Plane    تاثیر صفرهای سمت راست محور

$$A = A_0 \frac{1 - \frac{s}{Z}}{1}$$

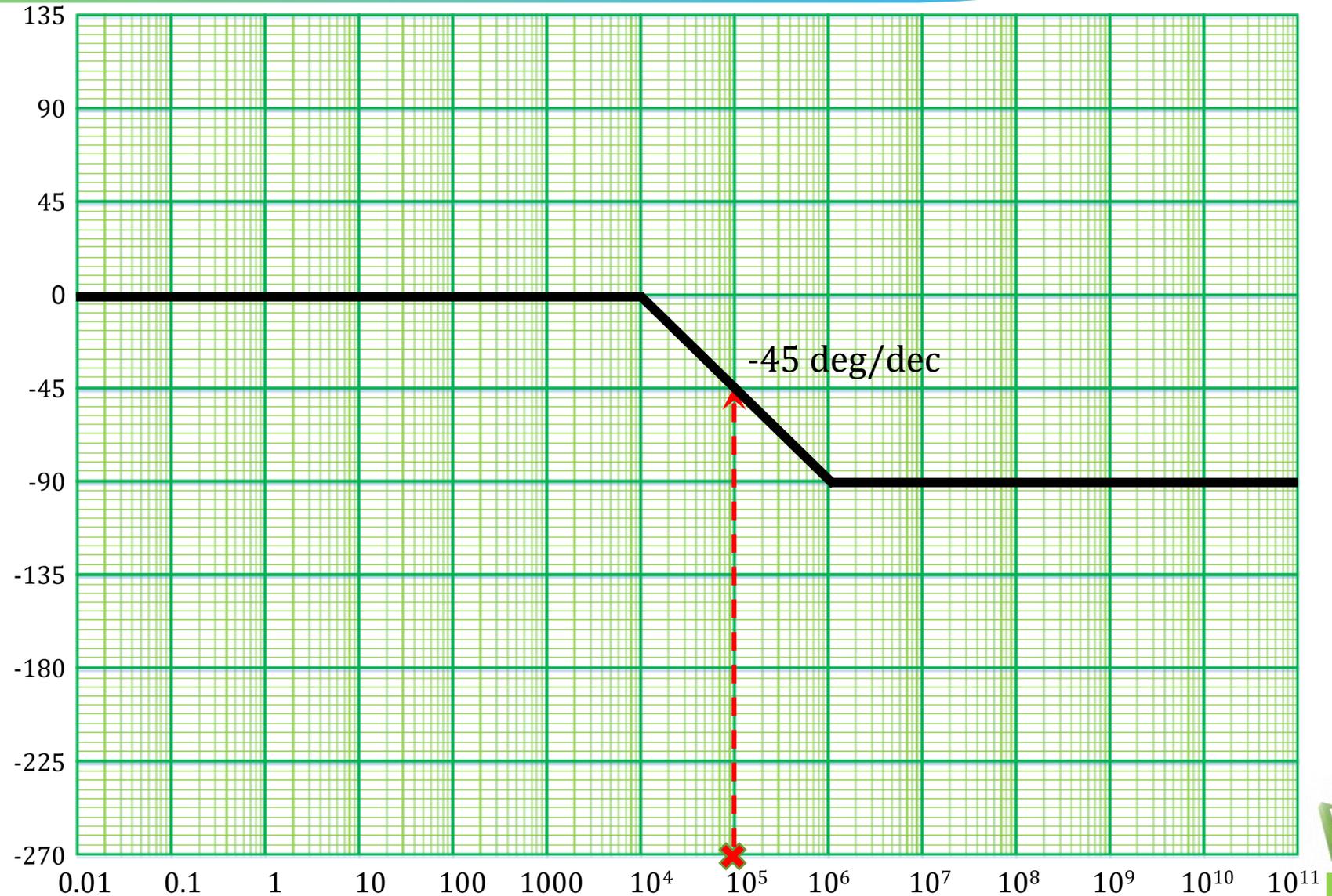
Phase: فاز  
 $\arctan(-\omega/Z)$

$$Z = 10^5$$

$$\omega = 0.1Z \rightarrow \angle A = a \tan(-0.1) \cong 0$$

$$\omega = Z \rightarrow \angle A = a \tan(-1) \cong -45$$

$$\omega = 10Z \rightarrow \angle A = a \tan(-10) \cong -90$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

Effect of Multiple Distance Poles    تاثیر چند قطب دور از هم

$$A = A_0 \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{P_1}\right)\left(1 + \frac{S}{P_2}\right)}$$

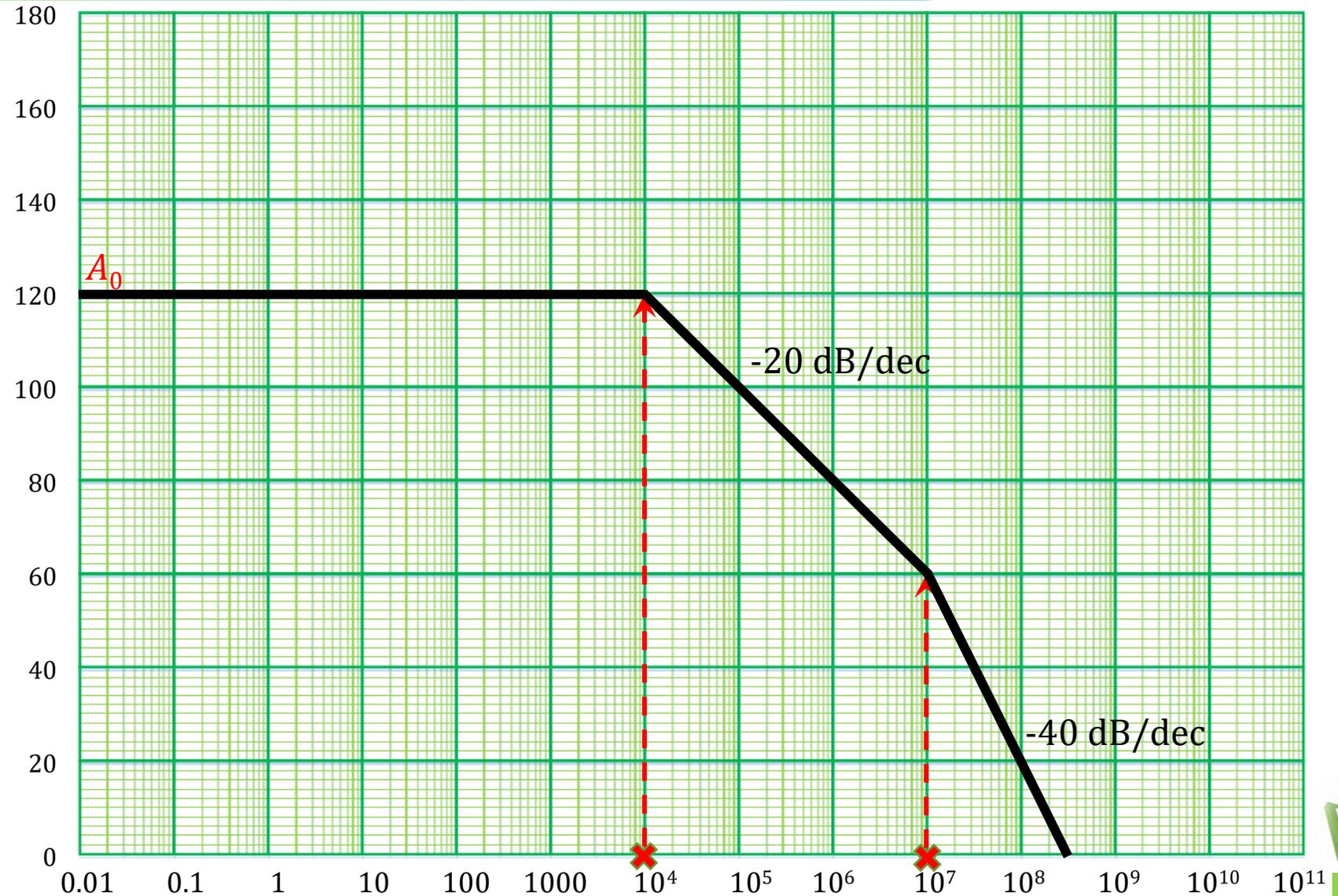
Amplitude: دامنه

$$20\text{Log}(A)$$

$$P_1 = 10^4$$

$$P_2 = 10^7$$

$$A_0 = 10^6 \triangleq 120 \text{ dB}$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

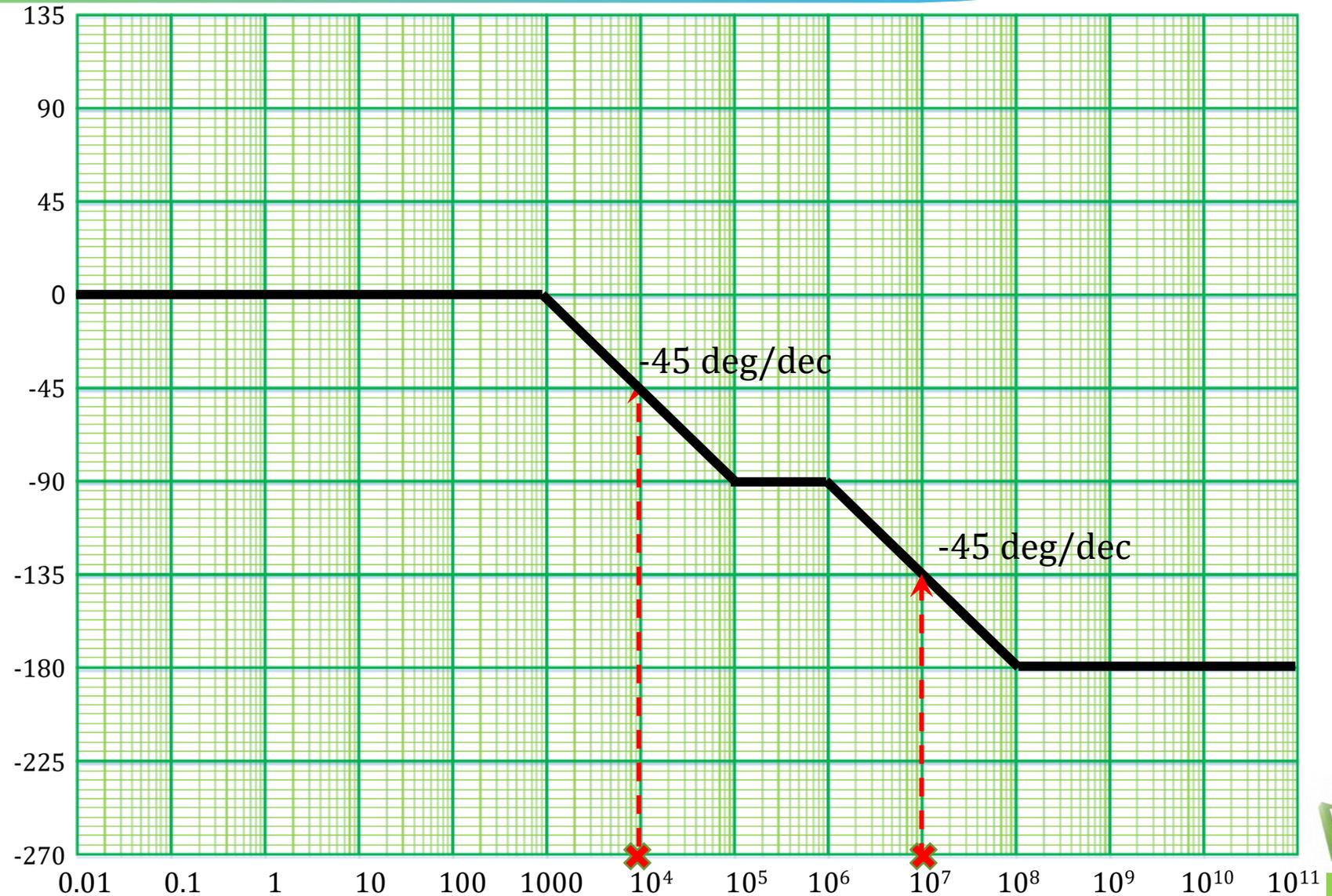
Effect of Multiple Distance Poles    تاثیر چند قطب دور از هم

$$A = A_0 \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{P_1}\right)\left(1 + \frac{S}{P_2}\right)}$$

Phase: فاز  
 $-\arctan(\omega/p_1) - \arctan(\omega/p_2)$

$$P_1 = 10^4$$

$$P_2 = 10^7$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

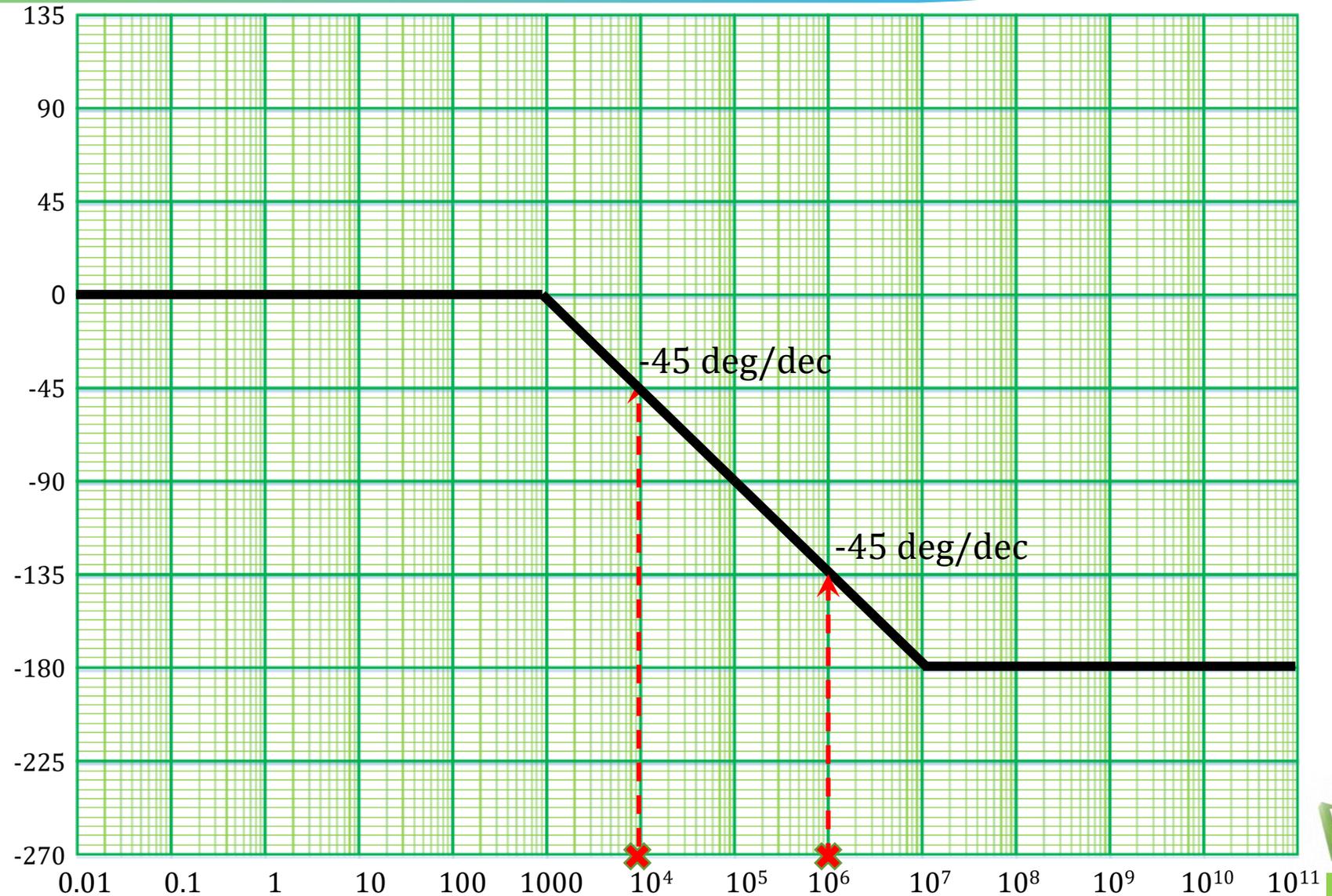
Effect of Multiple Distance Poles    تاثیر چند قطب دور از هم

$$A = A_0 \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{P_1}\right)\left(1 + \frac{S}{P_2}\right)}$$

Phase: فاز  
 $-\arctan(\omega/p_1) - \arctan(\omega/p_2)$

$$P_1 = 10^4$$

$$P_2 = 10^6$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

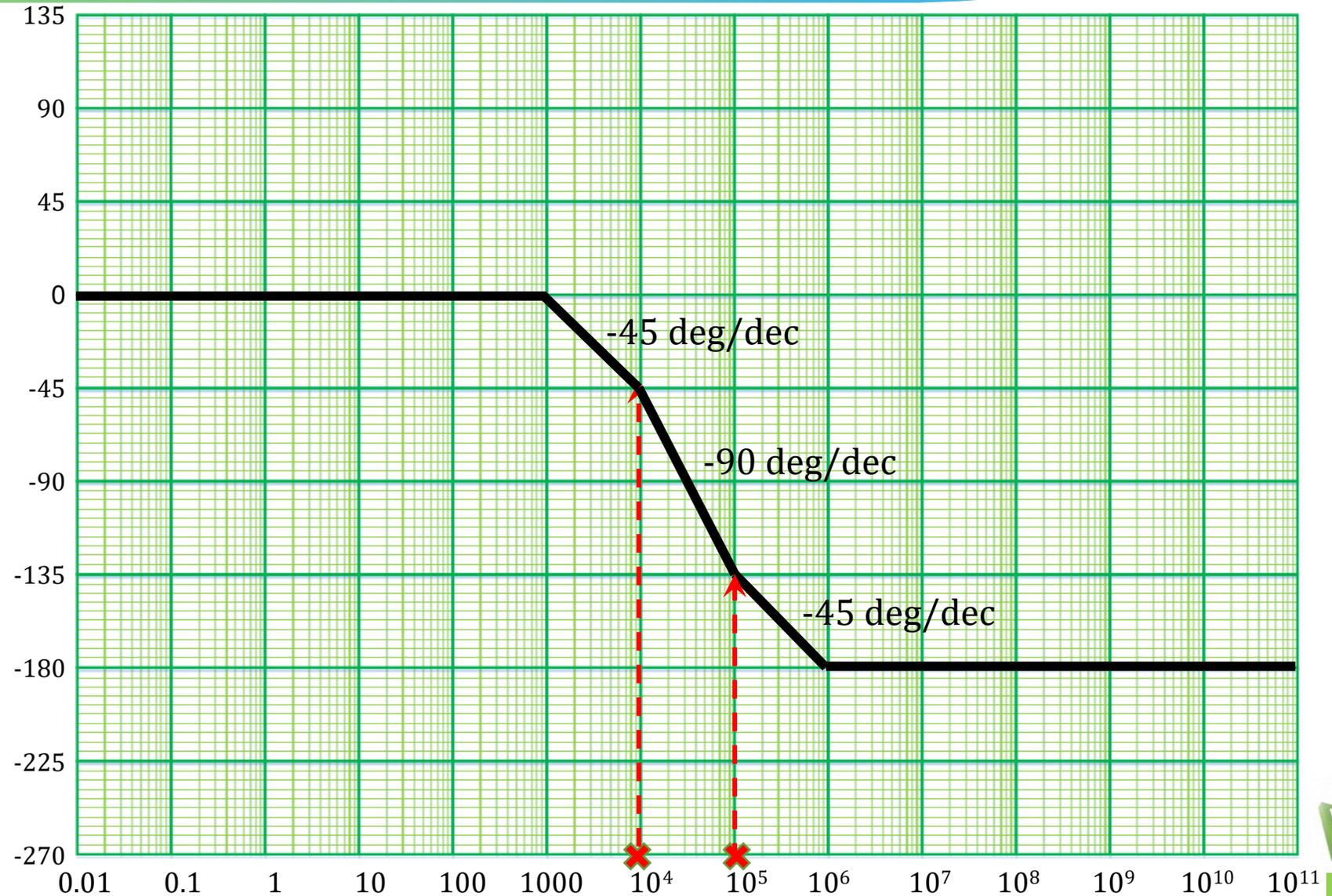
Effect of Multiple Distance Poles    تاثیر چند قطب دور از هم

$$A = A_0 \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{P_1}\right)\left(1 + \frac{S}{P_2}\right)}$$

Phase: فاز  
 $-\arctan(\omega/p_1) - \arctan(\omega/p_2)$

$$P_1 = 10^4$$

$$P_2 = 10^5$$



# Bode Diagram (Bode Plates)

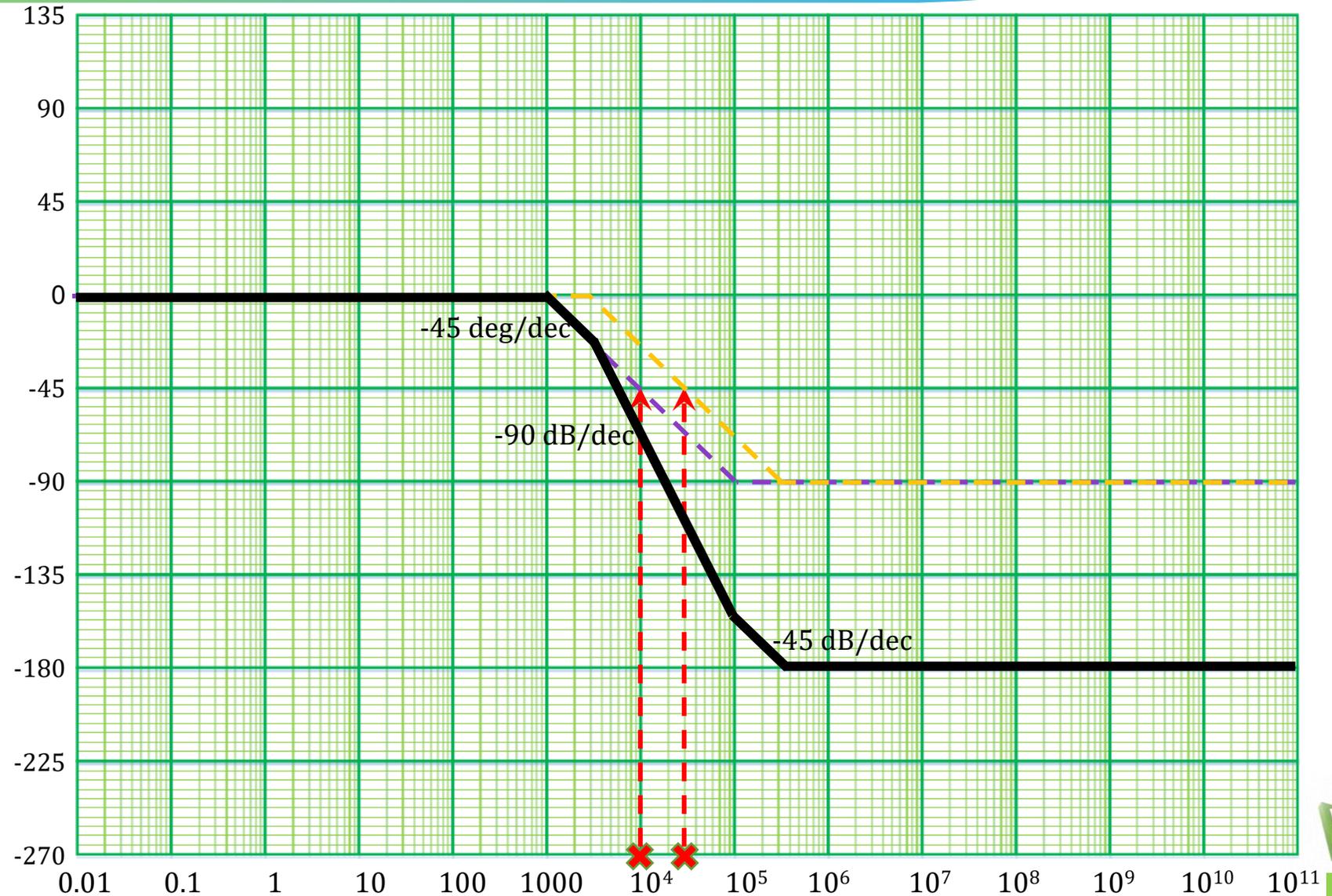
Effect of Multiple Close Poles    تاثیر چند قطب نزدیک به هم

$$A = A_0 \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{P_1}\right)\left(1 + \frac{S}{P_2}\right)}$$

Phase: فاز  
 $-\arctan(\omega/p_1) - \arctan(\omega/p_2)$

$$P_1 = 10^4$$

$$P_2 = 3 \times 10^4$$



# Practical Concerns

نکات عملی

DataSheet of a Transistor:  $f_T$ ,  $C_\mu$ ,  $\beta_0$

$$\frac{1}{2\pi f_T} = \left( \frac{C_\mu + C_\pi}{g_m} \right)$$

$$C_\pi = \frac{g_m}{2\pi f_T} - C_\mu$$

Usually  $C_\pi > C_\mu$

However,  $C_\mu$  can be much more detrimental than  $C_\pi$

