



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Σχεδίαση Μεικτών VLSI Κυκλωμάτων

Ενότητα 6: Παθητικοί και ενεργητικοί καθρέπτες  
ρεύματος

Αγγελική Αραπογιάννη

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών



# Καθρέφτες ρεύματος σε συνδεσμολογία σειράς (1 από 4)

Για  $\lambda \neq 0$

$$I_{D1} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right)_1 (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS1})$$

$$I_{D2} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right)_2 (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS2})$$

$$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \cdot \frac{1 + \lambda V_{DS2}}{1 + \lambda V_{DS1}}$$

$$V_{DS1} = V_{GS1} = V_{GS2} \neq V_{DS2}$$

Απαλλαγή από την επίδραση του μήκους καναλιού.

$$V_b: V_Y = V_X \Rightarrow I_{out} = I_{REF}$$

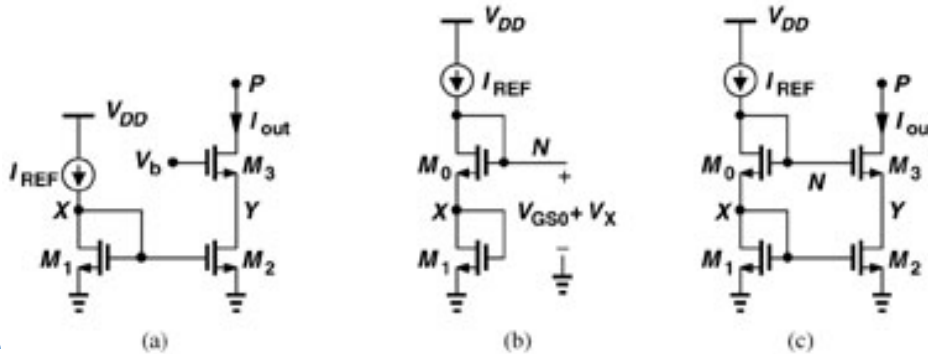
$$\Delta V_Y \approx \Delta V_P / [(g_{m3} + g_{mb3})r_{o3}]$$

$$V_{GS0} + V_X = V_{GS3} + V_Y$$

Αν διαλέξουμε:

$$(W/L)_3 / (W/L)_0 = (W/L)_2 / (W/L)_1$$

Τότε  $V_{GS3} = V_{GS0}$  και επομένως  $V_X = V_Y$

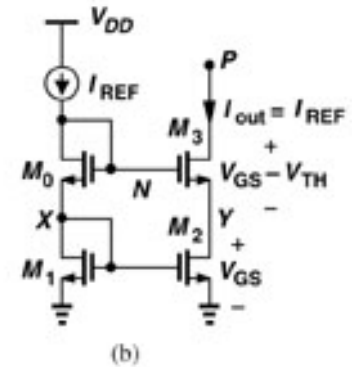
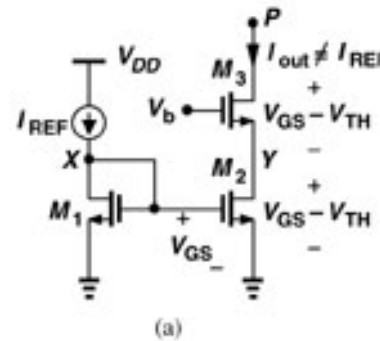


# Καθρέφτες ρεύματος σε συνδεσμολογία σειράς (2 από 4)

Περιθώριο τάσης στο P.

Χαμηλή  $V_p$ , άνισα  
ρεύματα

$$V_N - V_{TH} = V_{GS0} + V_{GS1} - V_{TH}$$
$$= (V_{GS0} - V_{TH}) + (V_{GS1} - V_{TH}) + V_{TH}$$



Ίσα ρεύματα, υψηλότερη  $V_p$

# Καθρέφτες ρεύματος σε συνδεσμολογία σειράς (3 από 4)

Συνδεσμολογία σειράς χαμηλής τάσης

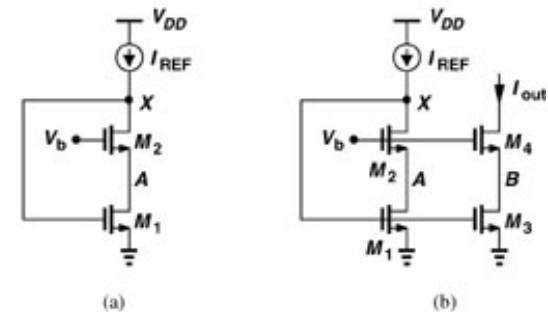
$$V_{GS2} + (V_{GS1} - V_{TH1}) \leq V_b \leq V_{GS1} + V_{TH2} \Rightarrow$$

$$V_{GS2} - V_{TH2} \leq V_{TH1}$$

$$\text{Αν } V_{GS2} = V_{GS4} \quad \text{και}$$

$$V_b = V_{GS2} + (V_{GS1} - V_{TH1}) = V_{GS4} + (V_{GS3} - V_{TH3})$$

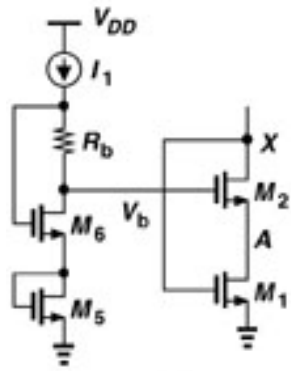
$$V_B = V_{GS1} + V_{GS0} - V_{TH3} - V_{GS3} = V_{GS1} - V_{TH3}$$



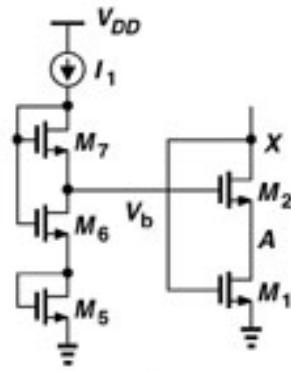
Ίσα ρεύματα και  
ελάχιστη τάση.

# Καθρέφτες ρεύματος σε συνδεσμολογία σειράς (4 από 4)

Πόλωση της συνδεσμολογίας σειράς  
χαμηλής τάσης (παραγωγή της  $V_b$ )

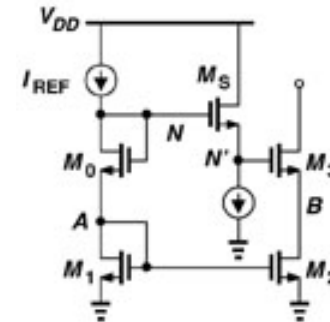


(a)



(b)

Πόλωση με ακολουθητή πηγής.



$$V_B = V_{GS1} + V_{GS0} - V_{TH3} - V_{GS3} = V_{GS1} - V_{TH3}$$



# Ενεργοί καθρέφτες ρεύματος (1 από 2)

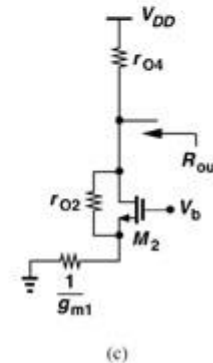
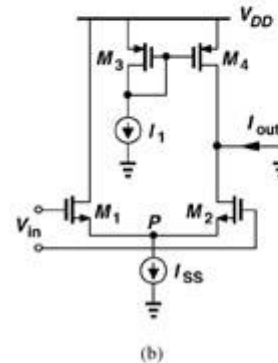
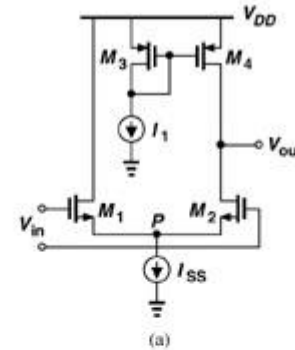
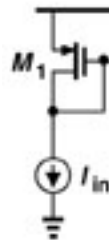
Α' Τρόπος

$$|A_V| = G_m R_{out}$$

$$G_m = I_{out} / V_{in} = (g_{m1} V_{in} / 2) / V_{in} = g_{m1} / 2$$

$$(1 + g_{m2} r_{O2})(1 / g_{m1,2}) + r_{O2} = 2r_{O2} + 1 / g_{m1} \approx 2r_{O2}$$

$$R_{out} \approx (2r_{O2}) || r_{O4}$$



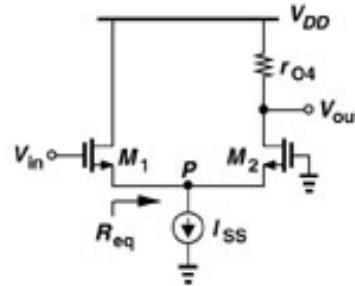
$$|A_v| \approx \frac{g_{m1}}{2} [(2r_{O2}) || r_{O4}]$$

για  $r_{O4} \rightarrow \infty \Rightarrow A_v \rightarrow g_{m1} r_{O2}$

# Ενεργοί καθρέφτες ρεύματος (2 από 2)

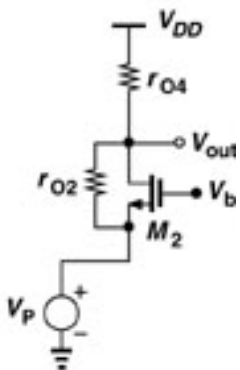
Β' Τρόπος

$$\frac{V_P}{V_{in}} = \frac{R_{eq}}{R_{eq} + \frac{1}{g_{m1}}}$$



$$R_{eq} \approx \frac{1}{g_{m2}} + \frac{r_{O4}}{g_{m2}r_{O2}} = \frac{1}{g_{m2}} \left( 1 + \frac{r_{O4}}{r_{O2}} \right)$$

$$\frac{V_P}{V_{in}} = \frac{1 + \frac{r_{O4}}{r_{O2}}}{2 + \frac{r_{O4}}{r_{O2}}}$$



$$\frac{V_{out}}{V_P} = \frac{1 + g_{m2}r_{O2}}{1 + \frac{r_{O2}}{r_{O4}}} \approx \frac{g_{m2}r_{O2}}{1 + \frac{r_{O2}}{r_{O4}}}$$

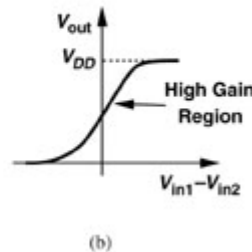
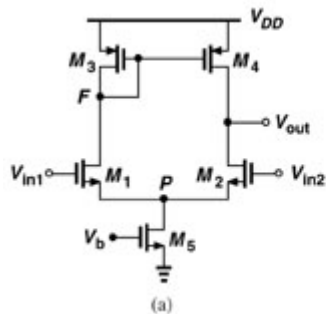
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1 + \frac{r_{O4}}{r_{O2}}}{2 + \frac{r_{O4}}{r_{O2}}} \cdot \frac{g_{m2}r_{O2}}{1 + \frac{r_{O2}}{r_{O4}}} = \frac{g_{m2}r_{O2}r_{O4}}{2r_{O2} + r_{O4}} = \frac{g_{m2}}{2} \left[ (2r_{O2}) \parallel r_{O4} \right]$$



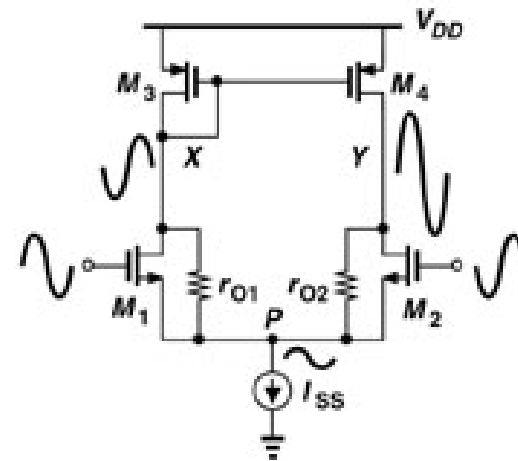
# Διαφορικό ζεύγος με ενεργό καθρέφτη ρεύματος (1 από 3)

Μετατρέπει τη διαφορική είσοδο σε μονόπλευρη έξοδο

Συμπεριφορά μεγάλου σήματος



Συμπεριφορά μικρού σήματος



Η μεταβολή της τάσης εξόδου  
εξαρτάται άμεσα από την τάση CM

$$\text{για } V_{in1} = V_{in2} \Rightarrow V_{out} = V_F = V_{DD} - |V_{GS3}|$$

$$V_p \neq 0$$

( οι ασυμμετρίες επηρεάζουν πολύ)

# Διαφορικό ζεύγος με ενεργό καθρέφτη ρεύματος (2 από 3)

## Α' Τρόπος

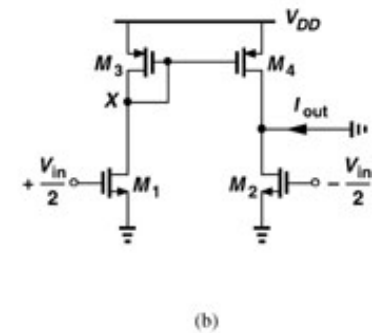
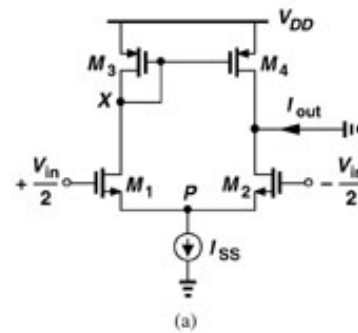
$$|A_V| = G_m R_{out}$$

$$I_{D1} = |I_{D3}| = |I_{D4}| = g_{m1,2} V_{in}/2$$

$$I_{D2} = -g_{m1,2} V_{in}/2$$

$$I_{out} = -g_{m1,2}' V_{in}$$

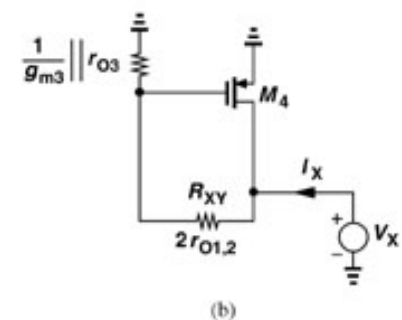
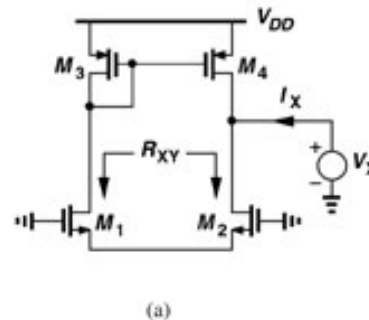
$$|G_m| = g_{m1,2}'$$



$$I_X = 2 \frac{V_X}{2r_{O1,2} + \frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3}} + \frac{V_X}{r_{O4}}$$

$$R_{out} \approx r_{O2} \parallel r_{O4}$$

$$|A_V| = G_m R_{out} = g_{m1,2} (r_{O2} \parallel r_{O4})$$



# Διαφορικό ζεύγος με ενεργό καθρέφτη ρεύματος (3 από 3)

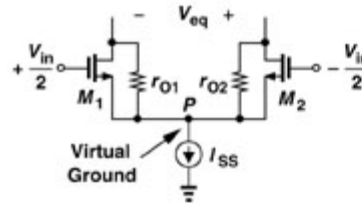
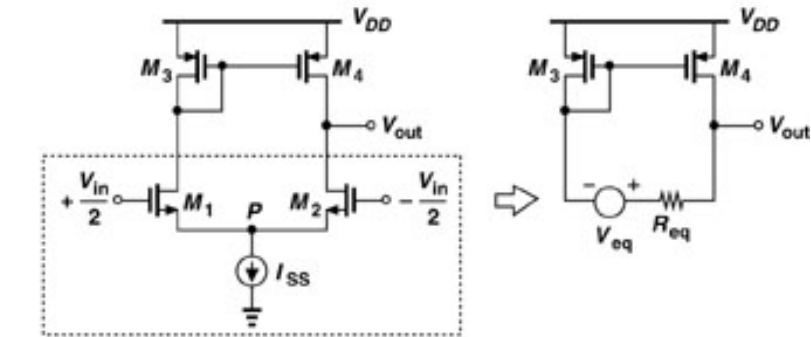
## Β' Τρόπος

$$V_{eq} = g_{m1,2} r_{O1,2} V_{in}$$

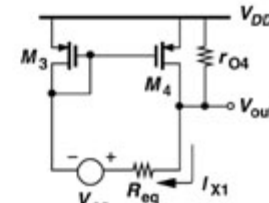
$$R_{eq} = 2r_{O1,2}$$

$$I_{X1} = \frac{V_{out} - g_{m1,2} r_{O1,2} V_{in}}{2r_{O1,2} + \frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3}}$$

$$2 \frac{V_{out} - g_{m1,2} r_{O1,2} V_{in}}{2r_{O1,2} + \frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3}} = - \frac{V_{out}}{r_{O4}}$$



(a)



(b)

$$A_v \quad 2r_{O1,2} \gg (1/g_{m3,4}) \parallel r_{O3,4} \Rightarrow$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{g_{m1,2} r_{O3,4} r_{O1,2}}{r_{O1,2} + r_{O3,4}} = g_{m1,2} (r_{O1,2} \parallel r_{O3,4})$$

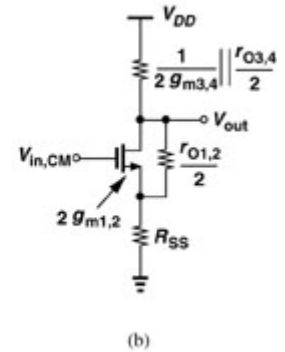
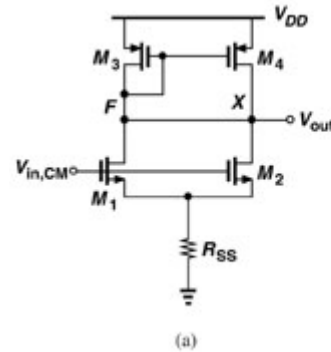
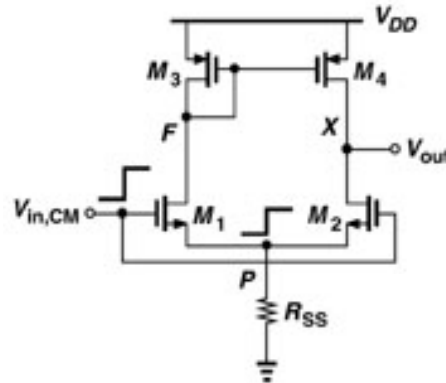


# Λειτουργία κοινού τρόπου (1 από 2)

α) Για  $R_{SS} \neq \infty$

$$A_{CM} \equiv \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in,CM}}$$

$$A_{CM} \approx \frac{-\frac{1}{2g_{m3,4}} \parallel \frac{r_{O3,4}}{2}}{\frac{1}{2g_{m1,2}} + R_{SS}} = \frac{-1}{1 + 2g_{m1,2}R_{SS}} \frac{g_{m1,2}}{g_{m3,4}}$$



Όπου  $1/(2g_{3,4}) \ll r_{o3,4}$  και  $r_{o,2}/2$  αμελητέο  $\Rightarrow$

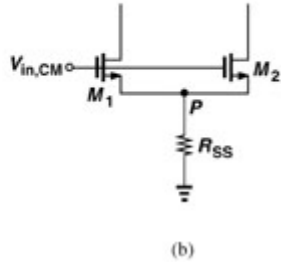
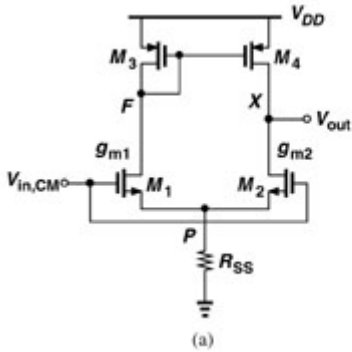
$$CMRR = \left| \frac{A_{DM}}{A_{CM}} \right| = g_{m1,2} (r_{O1,2} \parallel r_{O3,4}) \frac{g_{m3,4} (1 + 2g_{m1,2}R_{SS})}{g_{m1,2}} = (1 + 2g_{m1,2}R_{SS}) g_{m3,4} (r_{O1,2} \parallel r_{O3,4})$$

Ακόμη και με πλήρη συμμετρία το σήμα εξόδου επηρεάζεται από τις μεταβολές της εισόδου CM.



# Λειτουργία κοινού τρόπου (2 από 2)

β) Παρουσία αστοχιών π.χ.  $g_{m1} \neq g_{m2}$ .



$$\Delta V_P = \Delta V_{in,CM} \frac{R_{SS}}{R_{SS} + \frac{1}{g_{m1} + g_{m2}}}$$

$$\Delta I_{D1} = g_{m1} (\Delta V_{in,CM} - \Delta V_P) = \frac{\Delta V_{in,CM}}{R_{SS} + \frac{1}{g_{m1} + g_{m2}}} \frac{g_{m1}}{g_{m1} + g_{m2}}$$

$$\Delta I_{D2} = g_{m2} (\Delta V_{in,CM} - \Delta V_P) = \frac{\Delta V_{in,CM}}{R_{SS} + \frac{1}{g_{m1} + g_{m2}}} \frac{g_{m2}}{g_{m1} + g_{m2}}$$

$$|\Delta I_{D4}| = g_{m4} [(1/g_{m3}) || r_{O3}] \Delta I_{D1}$$

$$\Delta V_{out} = \left[ \frac{g_{m1} \Delta V_{in,CM}}{1 + (g_{m1} + g_{m2}) R_{SS}} \frac{r_{O3}}{r_{O3} + \frac{1}{g_{m3}}} - \frac{g_{m2} \Delta V_{in,CM}}{1 + (g_{m1} + g_{m2}) R_{SS}} \right] r_{O4} = \frac{\Delta V_{in,CM}}{1 + (g_{m1} + g_{m2}) R_{SS}} \frac{(g_{m1} - g_{m2}) r_{O3} - g_{m2} / g_{m3}}{r_{O3} + \frac{1}{g_{m3}}} r_{O4}$$

$$Av \quad r_{O3} \gg 1/g_{m3} \Rightarrow \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in,CM}} \approx \frac{(g_{m1} - g_{m2}) r_{O3} - g_{m2} / g_{m3}}{1 + (g_{m1} + g_{m2}) R_{SS}}$$



# Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα



# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική 2015. «Σχεδίαση Μεικτών VLSI Κυκλωμάτων. Παθητικοί και ενεργητικοί καθρέπτες ρεύματος.» Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI101/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Οι εικόνες και τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται είναι από το βιβλίο:

Behzad Razavi. 2000. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* (1 ed.). McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA ©2000.

