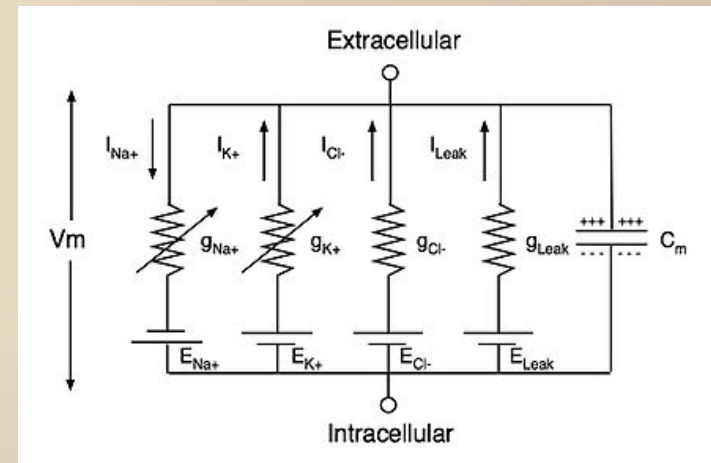
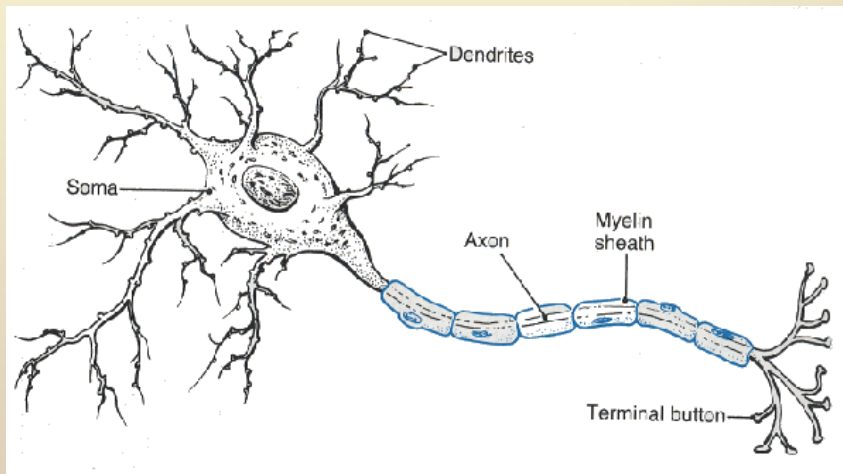


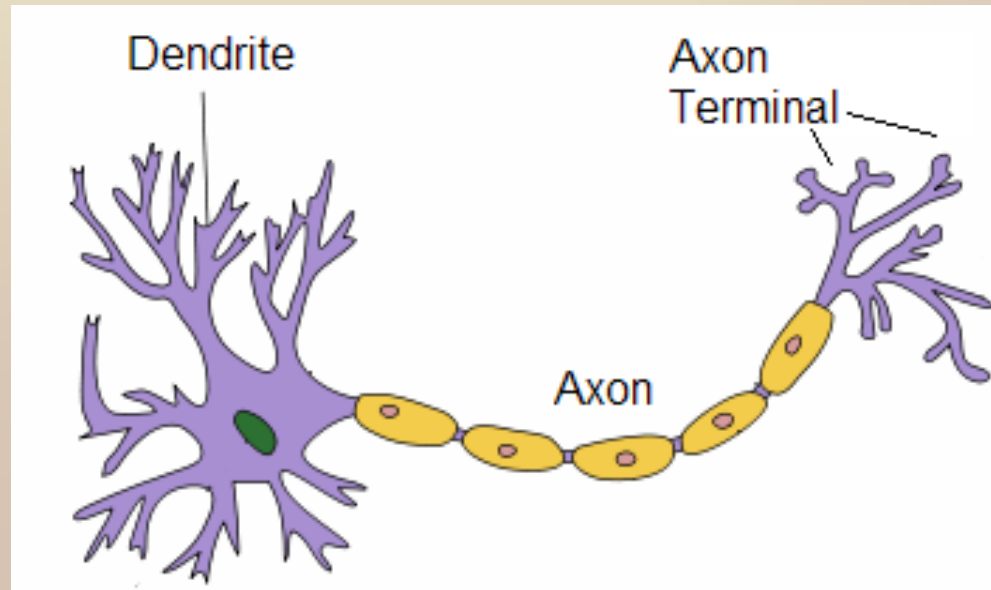
Hodgkin and Huxley neuron model simulation - Memristor



Αντρέας Αντωνίου

Νευρώνες (neurons)

- Είναι κύτταρο του νευρικού συστήματος το οποίο επεξεργάζεται και μεταδίδει πληροφορίες μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- Είναι το κύριο στοιχείο του εγκεφάλου.



Άξονας (axon)

- Κύρια χημικά ιόντα: K^+ , Na^+ , Cl^-
- Membrane potential : $(V_{in} - V_{out}) = -70mV$
- Resting potential : $(V_{in} - V_{out}) = -55mV$.
- Όταν η διέγερση είναι αρκετά μεγάλη ώστε:
 $V_{in} - V_{out} > -55mV \Rightarrow$ action potential
- Αν $V_{in} - V_{out} < -55mV$ ο άξονας δεν διεγείρεται για να μεταφέρει την πληροφορία

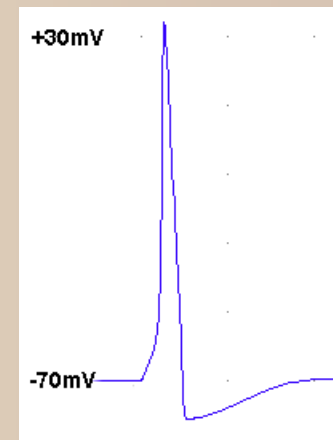


Fig. 2.2. A Single Action-Potential Spike

Hodgkin – Huxley model

- Περιγράφει με ένα απλό κύκλωμα την λειτουργία του άξονα του νευρώνα.
- Ο πυκνωτής C_m κρατά την διαφορά δυναμικού μεταξύ εσωτερικού του άξονα και εξωτερικού.
- Τα στοιχεία R_{Na} και R_K , αναφέρονται ως “χρονικά μεταβαλλόμενες αγωγιμότητες”
- $R_{leakage}$ περίπου σταθερά
- E δίνονται από τη φόρμουλα

του Nerst:

$$E = \frac{RT}{F} \ln \frac{C_i}{C_o}$$

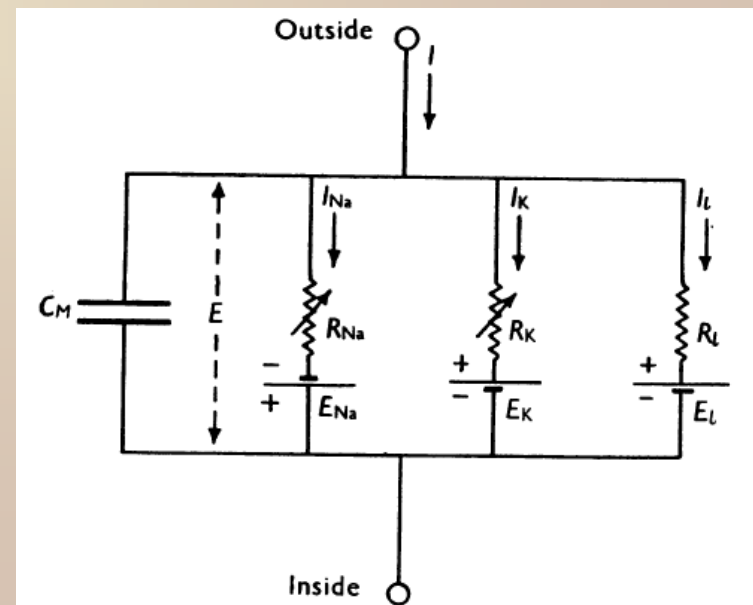
R: gas constant

T: absolute temperature

F: Faraday number

C_i : συγκέντρωση ιόντων μέσα στον άξονα

C_o : συγκέντρωση ιόντων έξω από τον άξονα



Hodgkin – Huxley model

- $$I = C_m \frac{dE}{dt} + I_{Na} + I_K + I_L$$

Όπου: $I_{Na} = g_{Na}(E - E_{Na})$, $I_K = g_K(E - E_{Na})$, $I_L = g_L(E - E_L)$

Ορίζω την ποσότητα $E_r = -55\text{mV}$.

Έτσι η εξίσωση μπορεί να γραφεί ως:

$$I = C_m \frac{dV}{dt} + I_{Na} + I_K + I_L$$

Όπου: $I_{Na} = g_{Na}(V - V_{Na})$, $I_K = g_K(V - V_{Na})$, $I_L = g_L(V - V_L)$

$V = E - E_r$, $V_{Na} = E - E_r$, $V_K = E - E_r$, $V_L = E - E_r$

Με τον τρόπο αυτό μετρώ το V από το resting potential

Hodgkin – Huxley model

- Αγωγιμότητα Na

$$g_{Na} = \overline{g_{Na}} m(t)^3 h(t)$$

$$\frac{dm}{dt} = \left[\frac{0.1(V + 25)}{e^{\frac{V+25}{10}} - 1} \right] (1 - m) - \left[4e^{\frac{V}{18}} \right] m \quad \frac{dh}{dt} = \left[0.07e^{\frac{V}{20}} \right] (1 - h) - \left[\frac{1}{e^{\frac{V+25}{10}} - 1} \right] h$$

Όπου

- $\overline{g_{Na}}$ σταθερά
- $m(t)$ μεταβλητή. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ 0 και 1.
Αντιπροσωπεύει την «είσοδο» ιόντων Na στον άξονα
- $h(t)$ μεταβλητή. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ 0 και 0,608.
Αντιπροσωπεύει την «έξοδο» ιόντων Na στον άξονα

Hodgkin – Huxley model

- Αγωγιμότητα K

$$g_K = \bar{g}_K n(t)^4$$

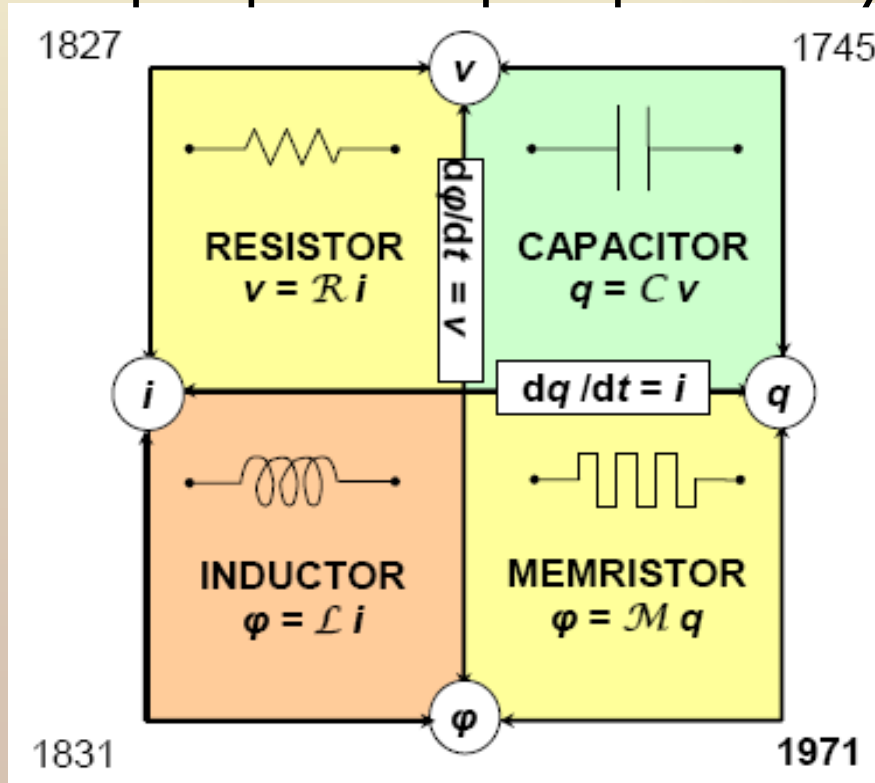
$$\frac{dn}{dt} = \left[\frac{0.01(V + 10)}{e^{\frac{V+10}{10}} - 1} \right] (1 - n) - \left[0.125 e^{\frac{V}{80}} \right] n$$

Όπου

- \bar{g}_K σταθερά
- $n(t)$ μεταβλητή. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ 0 και 1.
Αντιπροσωπεύει την «είσοδο» ιόντων K στον άξονα

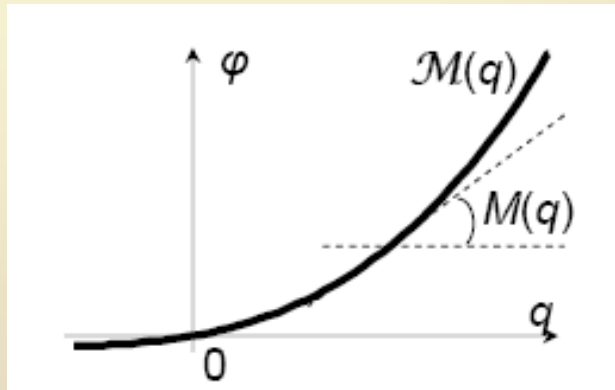
Memristor

- Είναι ένα παθητικό στοιχείο που συνδέει την μαγνητική ροή με το ηλεκτρικό φορτίο
- Μαζί με την αντίσταση, πυκνωτή και πηνίο θεωρείται το τέταρτο βασικό ηλεκτρικό στοιχείο



LEON O. CHUA, SENIOR MEMBER,
IEEE

Memristor



$$M(q) = \frac{d\varphi}{dq} = \frac{\frac{d\varphi}{dt}}{\frac{dq}{dt}} = \frac{v}{i}$$

$$\Rightarrow v(t) = M(q(t))i(t)$$

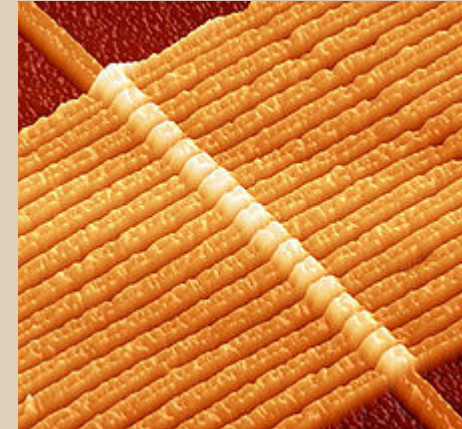
$M(q)$: incremental memristance (Ω)

$$i(t) = W(\varphi(t))v(t)$$

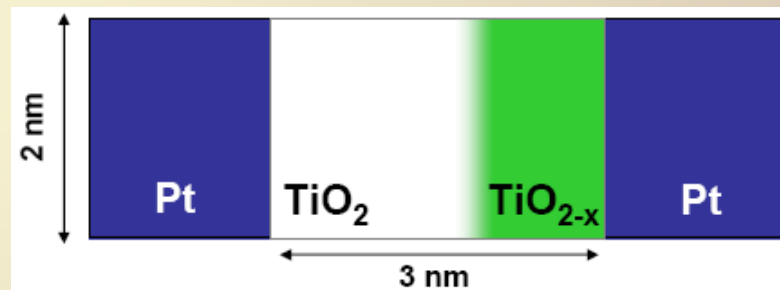
$W(\varphi)$: incremental memductance (S)

Κατασκευή Memristor

- Δεκέμβριος 2008
- HP LABS
- Stan Williams με τους συνεργάτες του
- Διάταξη των memristor σε πίνακα μειώνει τον χώρο που χρειάζεται
- Κάθε διαστάρωση δημιουργείται memstistor.

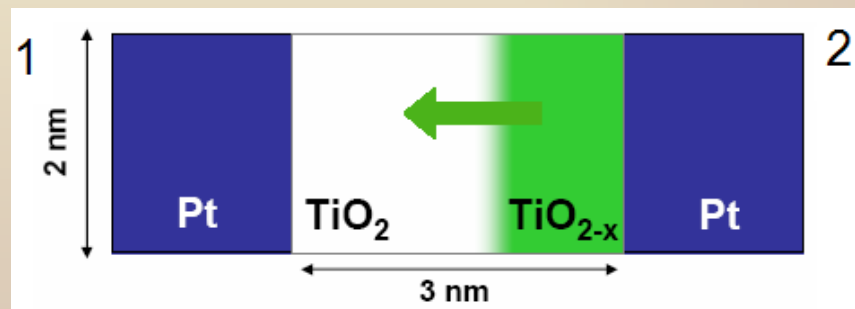


Κατασκευή Memristor



TiO₂: 2:1 λόγος οξυγόνου προς τιτάνιο (κακός αγωγός)

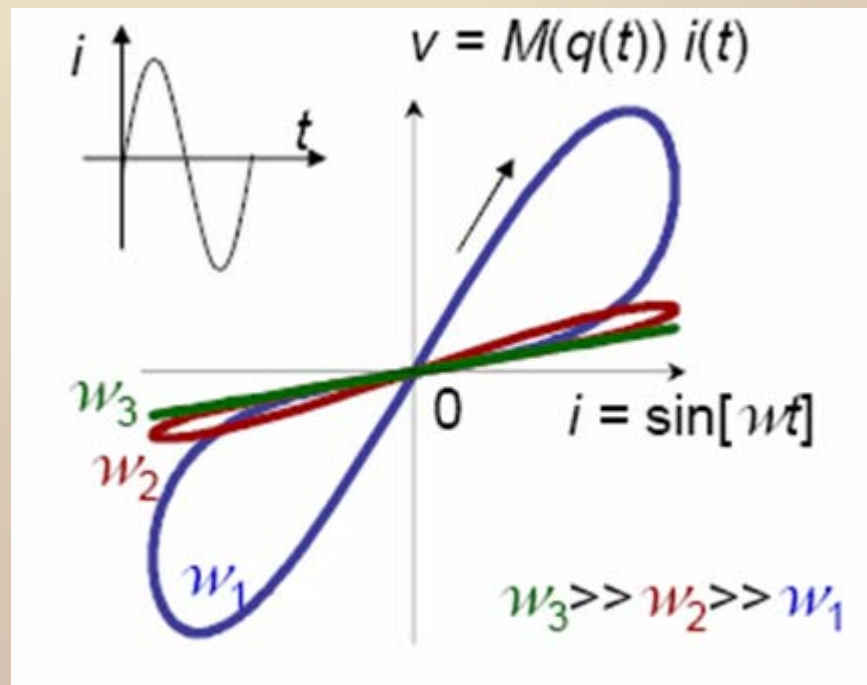
TiO_{2-x}: λείπουν 0,5% οξυγόνο (δίνει αγωγιμότητα)



Όταν εφαρμοστεί τάση στο άκρο 2, οι οπές απωθούνται, πάνε προς το μέρος του TiO₂ και μειώνεται η αντίστασή του

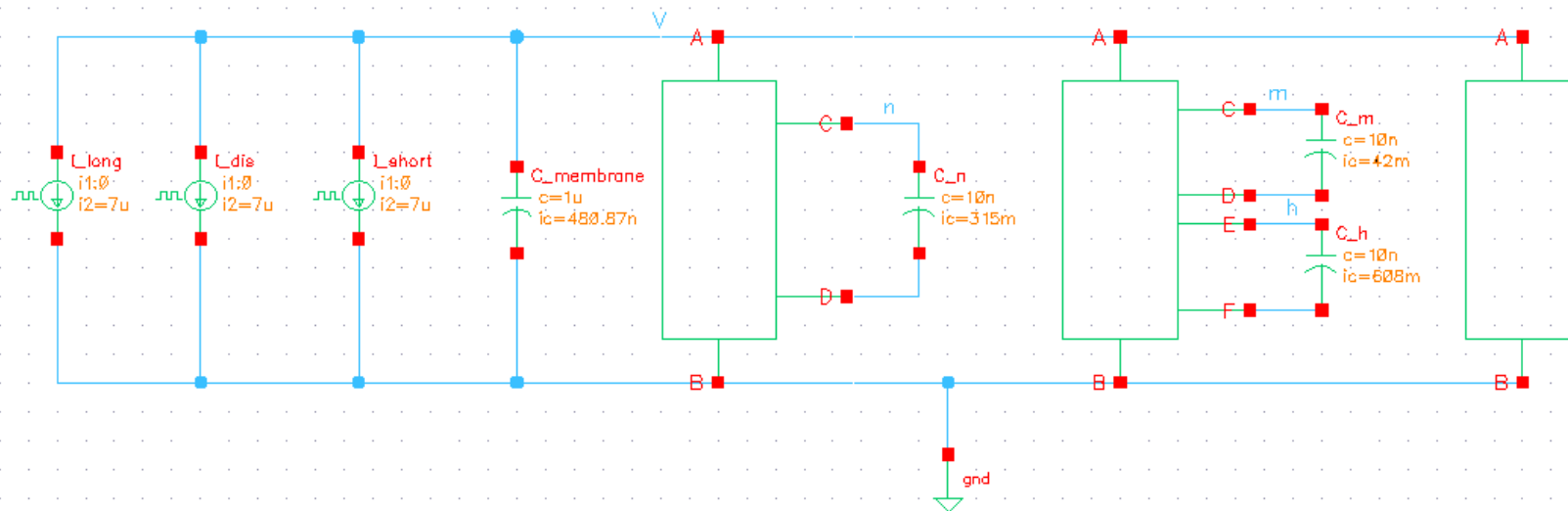
Memristor

- Παθητικό στοιχείο. ΔΕΝ αποθηκεύει ενέργεια!
- Όσο μεγαλώνει το ρεύμα που περνά από μέσα μεγαλώνει η τάση στα άκρα του μέχρι κάποια μέγιστη τιμή.



HH model - Cadence

- Για τις αγωγιμότητες Na και K χρησιμοποιώ two-port αγωγιμότητες.
- Τα «μαύρα κουτιά» διέπουν μαθηματικές εξισώσεις, που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Με AHDL (analogue hardware description language) περιγράφω την λειτουργία τους.
- Για κάθε μεταβλητή m, n, h υπάρχει ένας πυκνωτής ο οποίος παραγωγίζει το ρεύμα και παίρνω την μεταβλητή ως την πτώση τάσης στον πυκνωτή



HH model - Cadence

AHDL για την αγωγιμότητα K

```
// Spectre AHDL for andreas, k, ahdl
module k ( A, B, C, D ) ()
  node [V,I] A;
  node [V,I] B;
  node [V,I] C;
  node [V,I] D;
{
  real Vk=0.012;
  real gk=0.036;
  real an, bn;
  analog{
    V(D) <- V(B);
    an=(1000*10*(V(A)+0.01))/(exp((V(A)+0.01)/0.01)-1);
    bn=125*exp(V(A)/0.08);
    I(C, D) <- -10e-9*(an*(1-V(C))-bn*V(C));
    I(A, B) <- (V(A)-Vk)*gk*V(C)*V(C)*V(C)*V(C);
  }
}
```

HH model - memristor

- Τα στοιχεία R_{Na} και R_k , αναφέρονται ως “χρονικά μεταβαλλόμενες αγωγιμότητες”
- Υπάρχει περιοδικότητα στους παλμούς όταν διεγείρεται συνεχώς ο άξονας του νευρωνίου (60 Hz)
- Έχει πλάτος περίπου 110mV.
- Μήπως τα στοιχεία R_{Na} και R_k , είναι memristors;

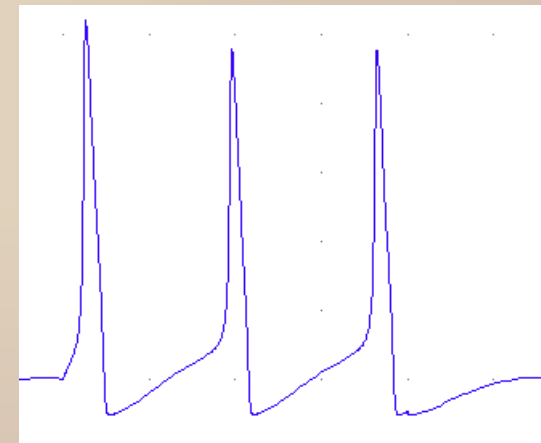


Fig. 2.3. A Burst of action potentials

HH model - memristor

Πράγματι, είναι!

