

Δυναμική Μηχανική Ανάλυση (Dynamic Mechanical Analysis)

Γ. Χ. Ψαρράς

Τμήμα Επιστήμης των Υλικών,
Σχολή Θετικών Επιστημών,
Πανεπιστήμιο Πατρών,
Πάτρα 26504

E-mail: G.C.Psarras@upatras.gr

<http://smatlab.upatras.gr/>

Μηχανική Ανάλυση

Οι δύο βασικές κατηγορίες μηχανικής ανάλυσης είναι:

- Η **Θερμομηχανική Ανάλυση** (thermomechanical analysis – TMA). Στην TMA εξέταση καταγράφεται η παραμόρφωση του υλικού υπό σταθερό φορτίο (τάση ή παραμόρφωση) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου.
- Η **Δυναμική Μηχανική Ανάλυση** (dynamic mechanical analysis – DMA). Κατά την DMA εξέταση ασκείται στο υλικό μία ημιτονειδής τάση, η οποία παράγει μία μεταβαλλόμενη παραμόρφωση που καθυστερεί ως προς την αρχική διέγερση. Η διαφορά φάσεως που εμφανίζεται σχετίζεται με την δομή του υλικού.

Και στις δύο τεχνικές εφαρμόζεται μία ελεγχόμενη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η διάκριση μεταξύ των τεχνικών TMA και DMA έχει σχεδόν εξαλειφθεί στις μέρες μας, καθώς οι σύγχρονες διατάξεις συνδυάζουν και τις δύο λειτουργίες (DMTA).



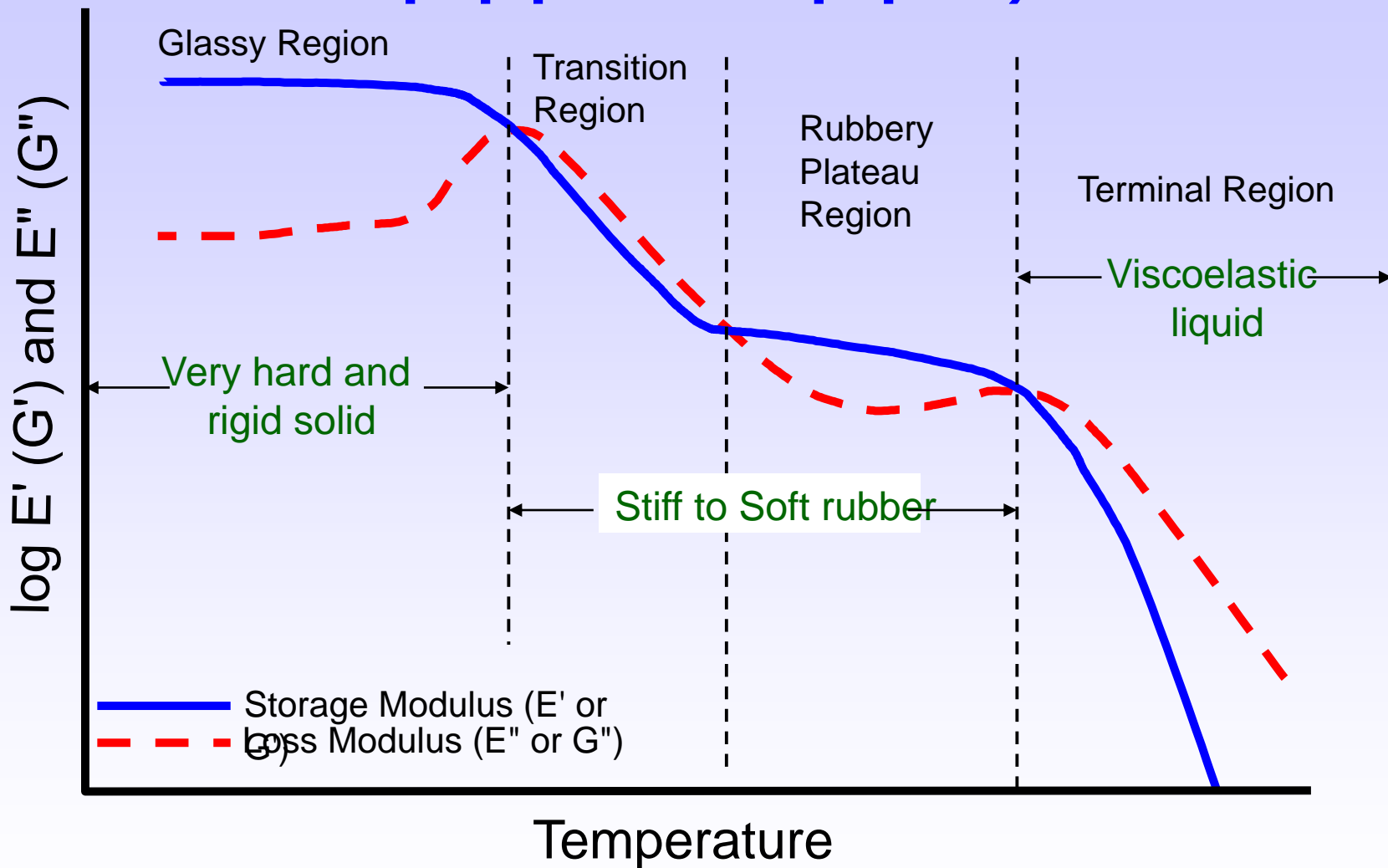
- Η **Θερμική Ανάλυση** αναφέρεται στην μέτρηση κάποιων χαρακτηριστικών ή ιδιοτήτων ενός υλικού ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου.
- Η **Ρεολογία** μελετά την ροή και την παραμόρφωση ορισμένων υλικών.
- Η **τεχνική DMA** παραμορφώνει μηχανικά ένα δοκίμιο και μετρά την απόκρισή του. Η παραμόρφωση μπορεί να εφαρμοσθεί ημιτονοειδώς, με σταθερά βήματα ή με δεδομένο ρυθμό. Η απόκριση του δοκιμίου καταγράφεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου.

- Οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο εύρος από διαφορετικές συμπεριφορές:
 - Πολύ σκληρά και άκαμπτα
 - Δύσκαμπτα έως Μαλακά ελαστομερή
 - Ιξωδοελαστικά ρευστά
- Η μηχανική συμπεριφορά των πολυμερών σχετίζεται με:
 - Την **Χημική Σύνθεση** του πολυμερούς
 - Την **Μοριακή Δομή** του πολυμερούς

Εφαρμογές της τεχνικής DMA – χαρακτηρισμός δομής/ιδιοτήτων

- Ανίχνευση μεταβάσεων που προέρχονται από μοριακές κινήσεις
- Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρο αποθήκευσης, συντελεστής απόσβεσης δονήσεων) φάσμα χρόνου (ή συχνότητας) και θερμοκρασίας
- Μελέτη σχέσεων δομής-ιδιοτήτων-μορφολογίας
- Υαλώδης μετάπτωση, δευτερεύουσες μεταβάσεις
- Κρυσταλλικότητα
- Διαχωρισμός φάσεων (πολυμερικά μείγματα, συμπολυμερή)
- Σύνθετα
- Γήρανση (φυσική ή χημική)
- Προσανατολισμός
- Επίδραση των προσθετικών (πλαστικοποιητές, υγρασία)

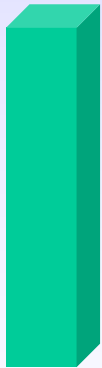
Φάσμα Ιξωδοελαστικότητας Χαρακτηριστικού Άμορφου Πολυμερούς



Παραμόρφωση των Στερεών

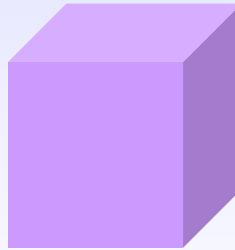
- Όλα τα υλικά μεταβάλλουν τις διαστάσεις τους (το σχήμα, τον όγκο τους ή και τα δύο) κάτω από την επίδραση μηχανικής τάσεως.
- Το μέτρο ελαστικότητας εκφράζει την αντίσταση του υλικού στην παραμόρφωση που προκαλεί η εφαρμογή εξωτερικής δυνάμεως.

Young's
Modulus



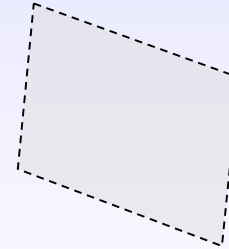
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Shear
Modulus



$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

Bulk
Modulus



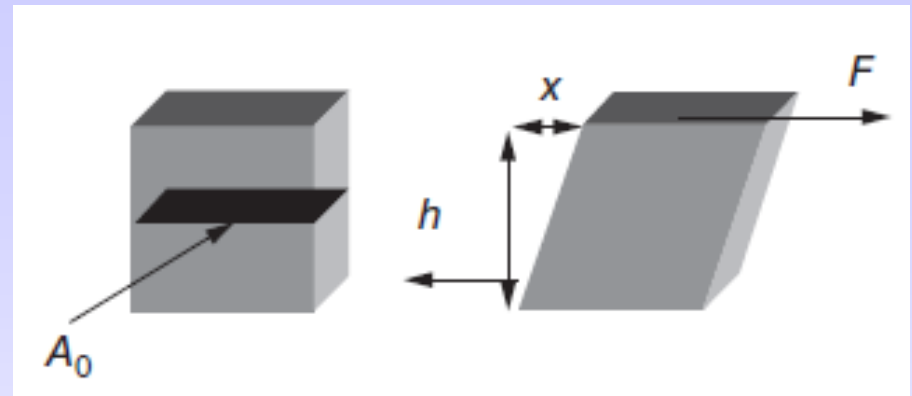
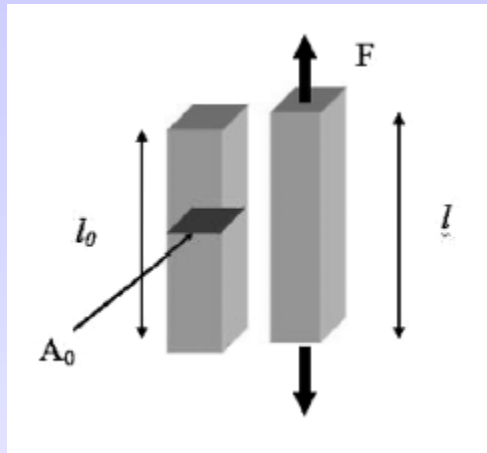
$$B = \frac{\sigma_{\text{hyd}}}{\Delta V/V_0}$$

Smart materials &
nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

Ιδανικά Στερεά



$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

$$\gamma = \frac{x}{h}$$

$$\tau = G\gamma$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$$

Smart materials &
nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

R. P. Chartoff, J. D. Menczel, S. H. Dillamn, *Dynamic Mechanical Analysis (DMA)* in J. D. Menczel, R. B. Prime, eds, *Thermal Analysis of Polymers*, p. 387-495, Wiley, 2009.

Ιδανικά Ρευστά

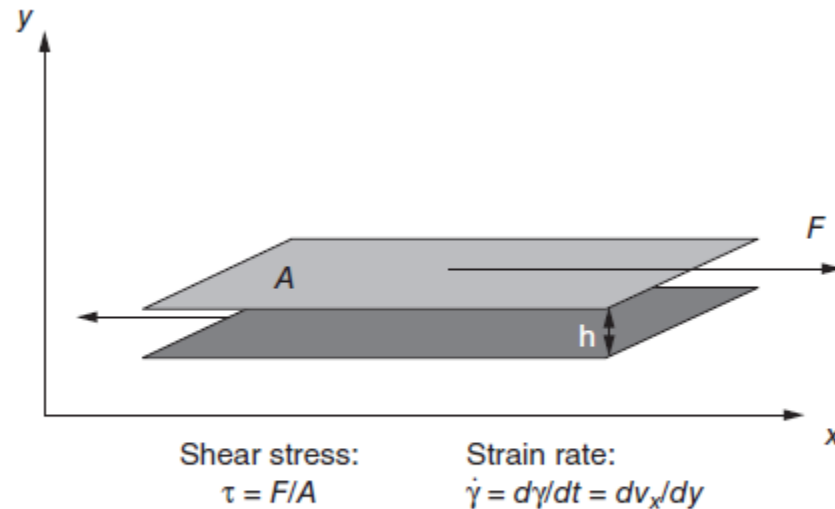


Figure 5.7. Illustration of two parallel plates separated by a fluid under shear, indicating the corresponding definitions of shear stress and strain rate.

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad \dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv_x}{dy} \quad \tau = \eta \dot{\gamma}$$

Η παραμόρφωση μεταβάλλεται με τον χρόνο καθώς οι πλάκες μετακινούνται η μία ως προς την άλλη.

Ιξωδοελαστικότητα

Εύρος Συμπεριφοράς των Υλικών

Στερεό Σώμα ----- Ρευστό
Ιδανικό Στερεό ----- Συνήθη Υλικά ----- Ιδανικό Ρευστό
Πλήρως Ελαστική ----- Ιξωδοελαστική ----- Πλήρως Ιξώδης

Ιξωδοελαστικότητα: Η συμπεριφορά κατά την οποία παρατηρούνται ταυτόχρονα ιξώδεις και ελαστικές ιδιότητες.

Ιξωδοελαστική Συμπεριφορά

Υπάρχουν τρεις θεμελιώδεις μέθοδοι για την μελέτη της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των πολυμερών:

- Ο ερπυσμός (creep),
- Η χαλάρωση τάσης (stress relaxation) και
- Η δυναμική μηχανική ανάλυση (dynamic mechanical analysis).

Δοκιμή Ερπυσμού

Σε μία δοκιμή ερπυσμού το δοκίμιο τίθεται υπό την επίδραση σταθερής τάσης και καταγράφεται η προκύπτουσα παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου.

Ένα ιδανικό ελαστικό στερεό επιδεικνύει ακαριαία παραμόρφωση σύμφωνα με τον νόμο του Hooke.

Σε ένα ιδανικό ρευστό δεν υφίσταται αρχική ελαστική παραμόρφωση και η παραμόρφωση αυξάνει συνεχώς με κλίση αντιστρόφως ανάλογη του ιξώδους του. Ο ρυθμός παραμόρφωσης παραμένει σταθερός. Αφαίρεση της τάσης δεν επιφέρει ανάκτηση της ελαστικής παραμόρφωσης. Το ρευστό σταματά να ρέει, δηλαδή ο ρυθμός παραμόρφωσης μηδενίζεται.

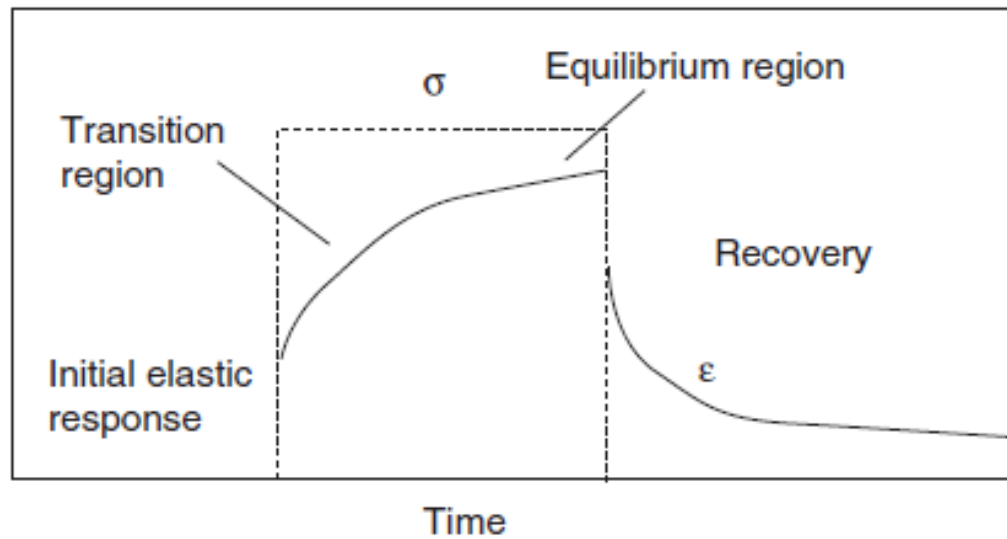


Figure 5.8. Typical stress (----) and strain (—) curves as a function of time during a creep experiment.

Τα ιξωδοελαστικά υλικά επιδεικνύουν ενδιάμεση συμπεριφορά. Η συνάρτηση της παραμόρφωσης με τον χρόνο παρουσιάζει τέσσερις διακριτές περιοχές: την **περιοχή ελαστικής απόκρισης**, την περιοχή μετάβασης ($d\varepsilon/dt < 0$), την **περιοχή ισορροπίας** ($d\varepsilon/dt = \text{σταθ.}$) και την **περιοχή ανάκτησης ή αποκατάστασης**, που χαρακτηρίζεται από ανάκτηση της αρχικής ελαστικής παραμόρφωσης και εκθετική μείωση της παραμόρφωσης τείνοντας σε μία σταθερή μη-μηδενική τιμή.

Επειδή η παραμόρφωση στις δοκιμές ερπυσμού είναι χρονικά εξαρτώμενη, ενώ η τάση παραμένει σταθερή, χρησιμοποιείται συνήθως, για την περιγραφή των δεδομένων, το μέτρο ένδοσης (compliance):

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma}$$

$$J(0) = \frac{\varepsilon(0)}{\sigma} = \frac{1}{E}$$

Χαλάρωση Τάσης

Σε μία δοκιμή χαλάρωσης τάσης το δοκίμιο τίθεται υπό σταθερή παραμόρφωση και η προκύπτουσα τάση καταγράφεται ως συνάρτηση του χρόνου.

Η απόκριση ενός ιδανικού ελαστικού στερεού θα είναι μία τάση σταθερή ανεξάρτητη από τον χρόνο.

Ενώ ένα ιδανικό ρευστό αποκρίνεται με μηδενισμό της τάσης μόλις εφαρμοστεί παραμόρφωση.

Τα ιξωδοελαστικά υλικά επιδεικνύουν τάση που μειώνεται με τον χρόνο.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon}$$

Δυναμική Μηχανική Ανάλυση

Το εξεταζόμενο δοκίμιο τοποθετείται στις κατάλληλες αρπάγες και σε αυτό ασκείται μεταβαλλόμενη τάση της μορφής:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$$

Η απόκριση του δοκιμίου δίνει μία μεταβαλλόμενη παραμόρφωση που μπορεί να εκφρασθεί μέσω της σχέσεως:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad \text{ή} \quad \varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$$

Οι δύο ποσότητες συνδέονται με την σχέση:

$$\sigma(t) = E^*(\omega) \gamma(t)$$

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega)$$

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$$

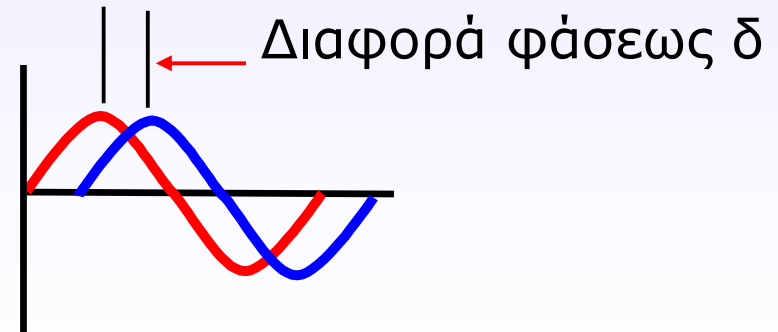
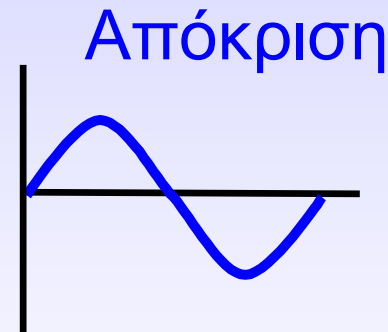
$$E^*(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega)$$

Οι όροι $E'(\omega)$ και $E''(\omega)$ αναφέρονται ως το (δυναμικό) μέτρο αποθήκευσης και το (δυναμικό) μέτρο απωλειών αντίστοιχα. Για ένα ιξωδοελαστικό πολυμερές το E' χαρακτηρίζει την ικανότητα του πολυμερούς να αποθηκεύει ενέργεια (ελαστική συμπεριφορά), ενώ το E'' εκφράζει την τάση του υλικού να διαχέει ενέργεια (ιξώδης συμπεριφορά).

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$$

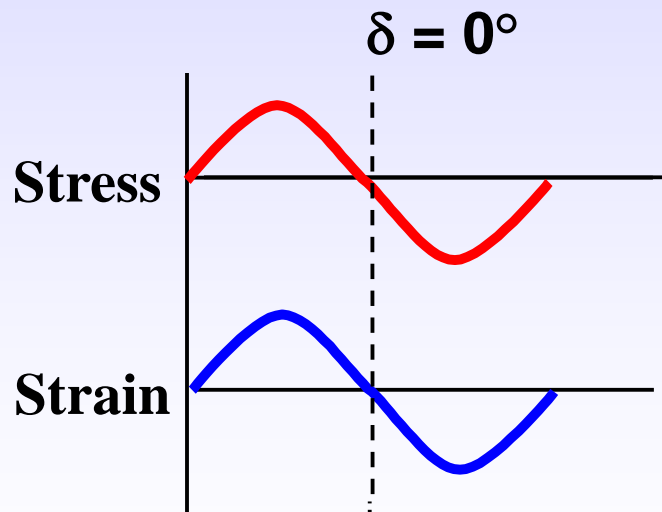
Δοκιμές Δυναμικής Μηχανικής Ανάλυσης

- Εφαρμόζεται μία χρονικά μεταβαλλόμενη (ημιτονοειδής) διέγερση (τάση ή παραμόρφωση) στο δείγμα.
- Μετράται η απόκριση (τάση ή παραμόρφωση) του υλικού.
- Μετράται η διαφορά φάσεως δ , μεταξύ διέγερσης και απόκρισης.

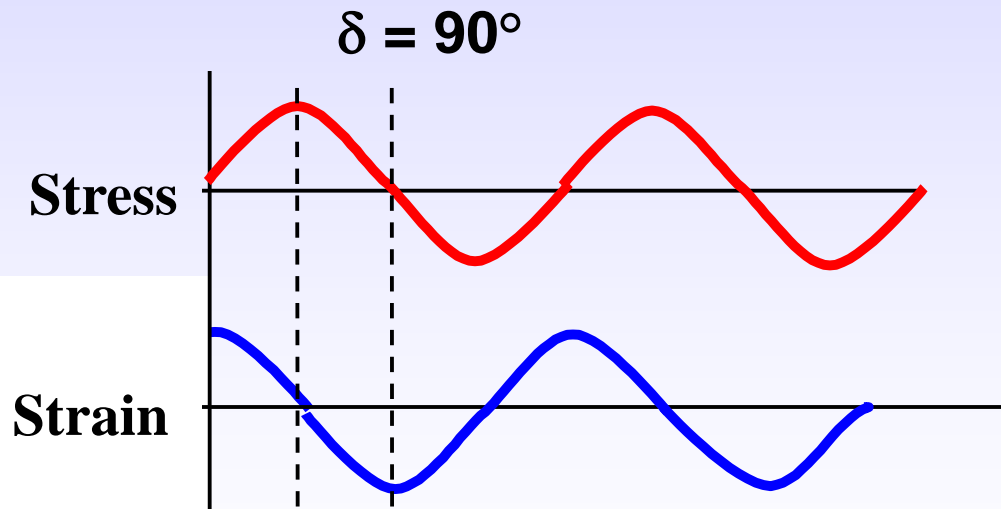


Απόκριση στις δύο Οριακές Συνθήκες

Πλήρως Ελαστική Απόκριση
(Hookean Solid)



Πλήρως Ιξώδης
Απόκριση
(Newtonian Liquid)

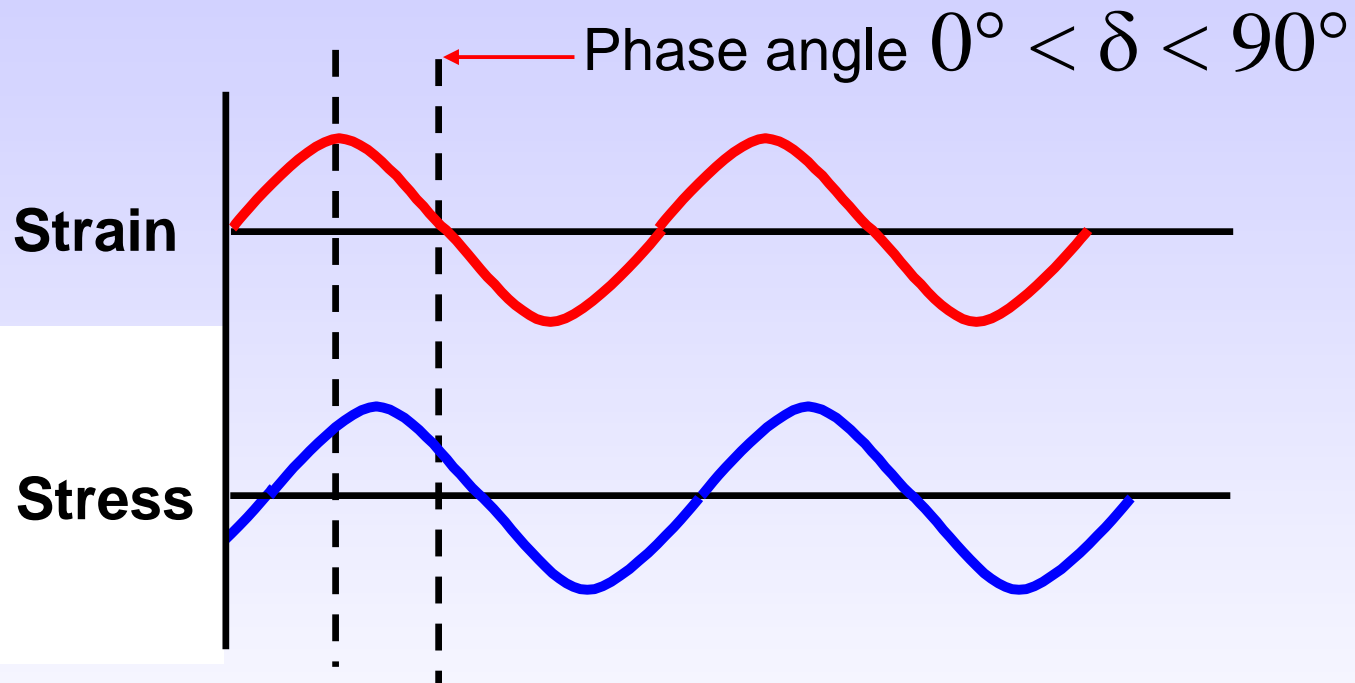


Smart materials &
nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

Ιξωδοελαστική Απόκριση



Ιξωδοελαστικοί Παράμετροι

- Η τάση σε ένα δυναμικό πείραμα είναι μιγαδική ποσότητα σ^* ,
- Η μιγαδική τάση χωρίζεται σε πραγματικό και φανταστικό μέρος:
 - 1) Η ελαστική τάση που βρίσκεται σε φάση με την παραμόρφωση.

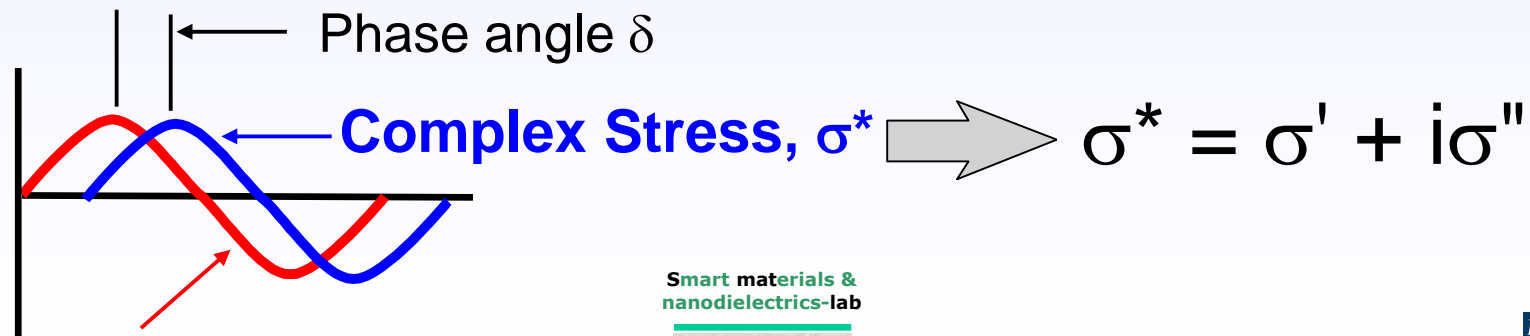
$$\sigma' = \sigma_0 \cos \delta$$

όπου ο όρος σ' εκφράζει τον βαθμό κατά τον οποίο το υλικό συμπεριφέρεται ως τέλειο ελαστικό σώμα.

- 2) Μία ιξώδη τάση σε φάση με τον ρυθμό παραμόρφωσης.

$$\sigma'' = \sigma_0 \sin \delta$$

όπου ο όρος σ'' εκφράζει τον βαθμό κατά τον οποίο το υλικό συμπεριφέρεται ως ιδανικό ρευστό .



Smart materials &
nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Department
of
**Materials
Science**
UNIVERSITY OF PATRAS

Μιγαδικό Μέτρο

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)}}{\varepsilon_0 e^{i\omega t}} = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) e^{i\delta} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \delta + i \sin \delta)$$

Το μιγαδικό μέτρο είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των υλικών. Σε συνθήκες επιβολής μικρών παραμορφώσεων είναι συνάρτηση του χρόνου και η απόκριση των υλικών βρίσκεται στην γραμμική ιξωδοελαστική περιοχή. Δηλαδή, τα μεγέθη της τάσης και της παραμόρφωσης συνδέονται γραμμικά.

$$E^* = E' + iE''$$

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta$$

DMA Ιξωδοελαστικοί Παράμετροι

Το Μιγαδικό Μέτρο: Εκφράζει την συνολική αντίσταση του υλικού στην παραμόρφωση.

$$E^* (G^*) = \text{Stress/Strain}$$

Το Μέτρο Αποθήκευσης (Ελαστικό): Εκφράζει (μετρά) την ελαστικότητα του υλικού και την ικανότητά του να αποθηκεύει ενέργεια.

$$E' (G') = (\text{stress/strain})\cos\delta$$

Το Μέτρο Απωλειών (Ιξώδες): Εκφράζει την ικανότητα του υλικού να διαχέει ενέργεια. Η ενέργεια «χάνεται» ως θερμότητα.

$$E'' (G'') = (\text{stress/strain})\sin\delta$$

Εφαρμοσμένη των Απωλειών: Εκφράζει (μετρά) την ικανότητα απόσβεσης δονήσεων του υλικού.

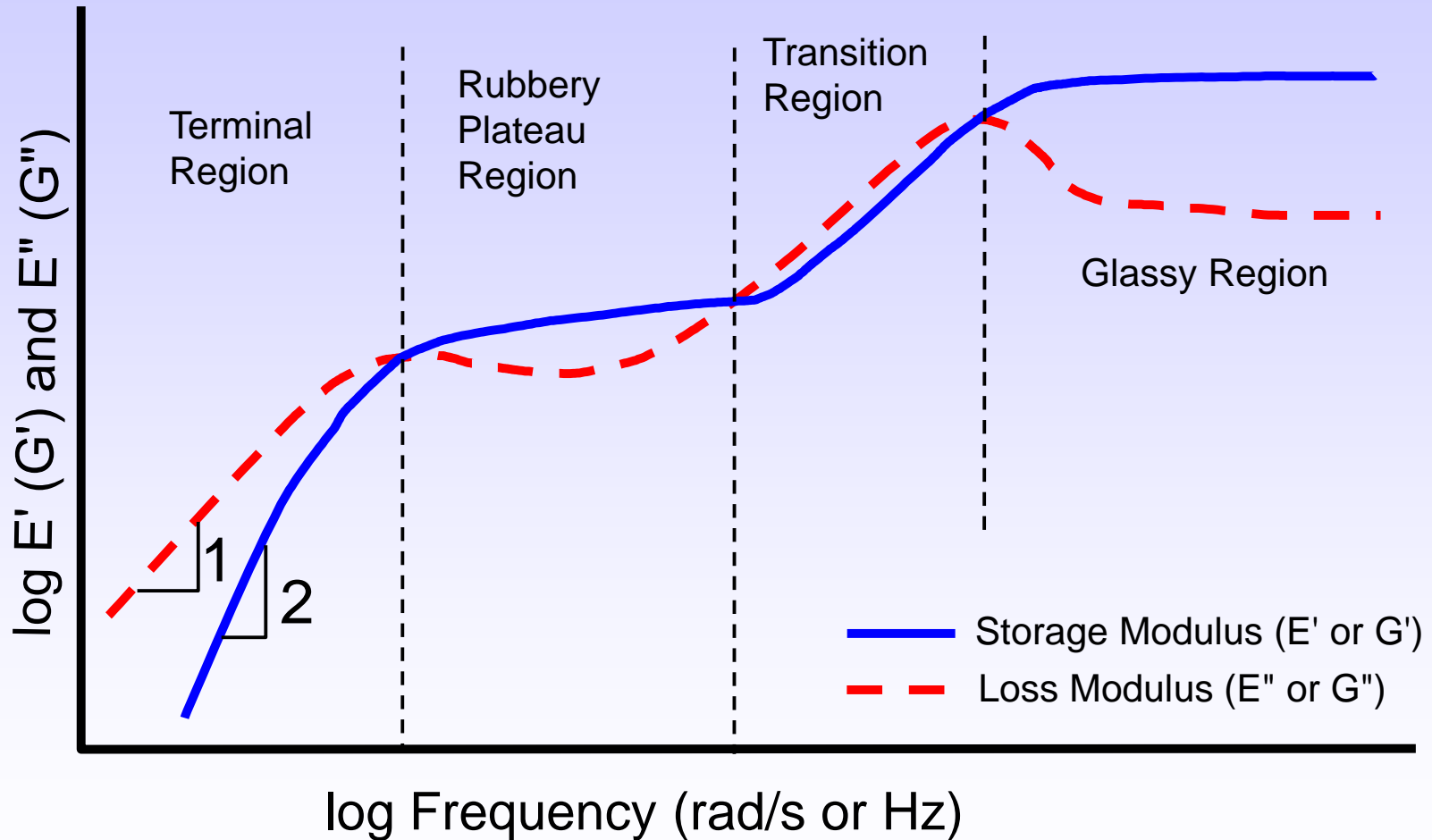
$$\tan \delta = E''/E' (G''/G')$$

Smart materials &
nanodielectrics-lab

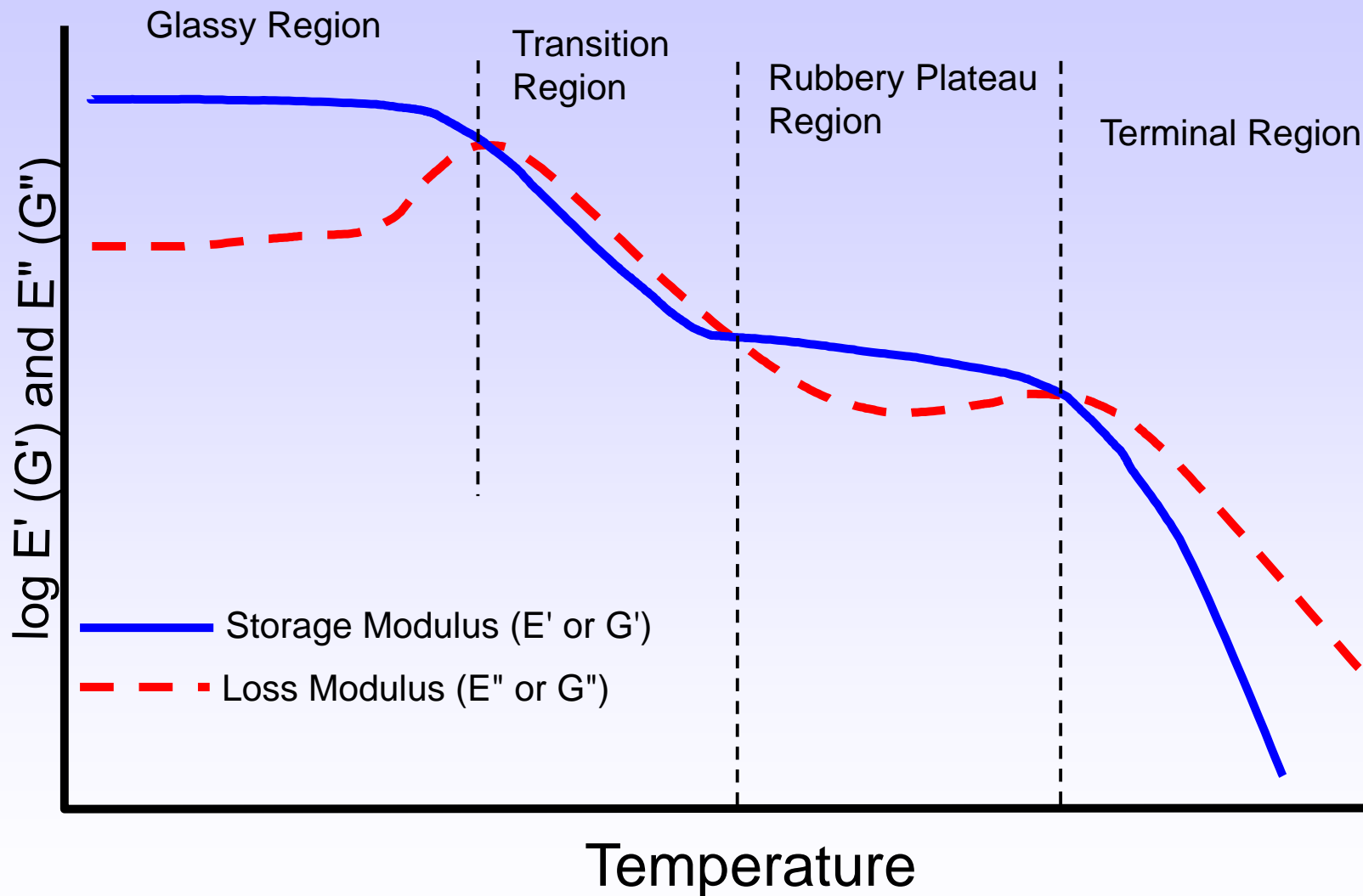
σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

Σάρωση Συχνοτήτων: Απόκριση του Υλικού



Μεταβολή της Θερμοκρασίας: Απόκριση του Υλικού

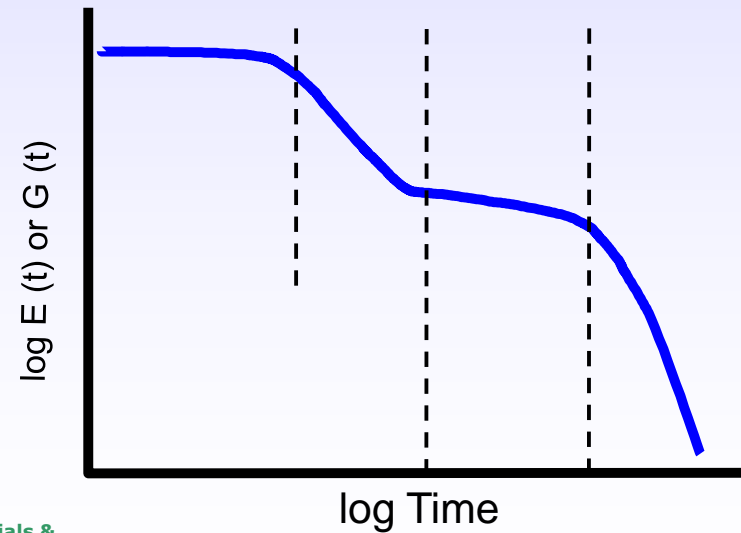
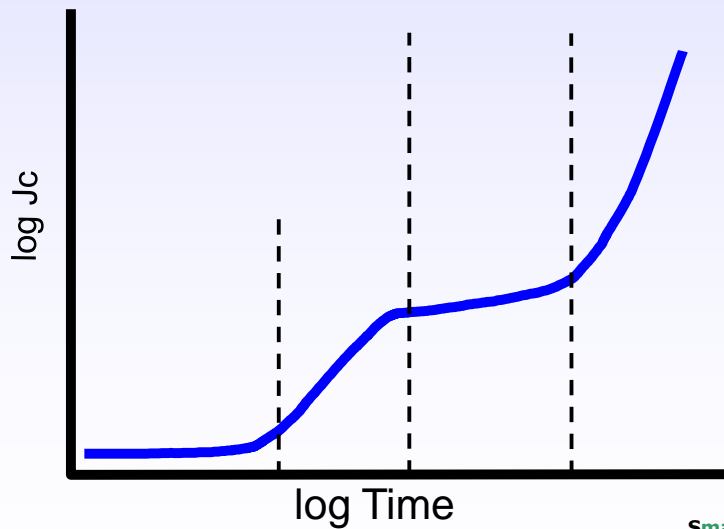
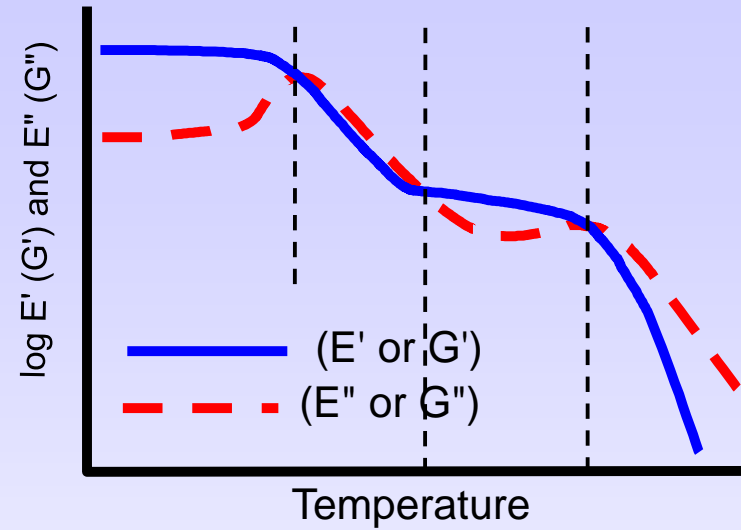
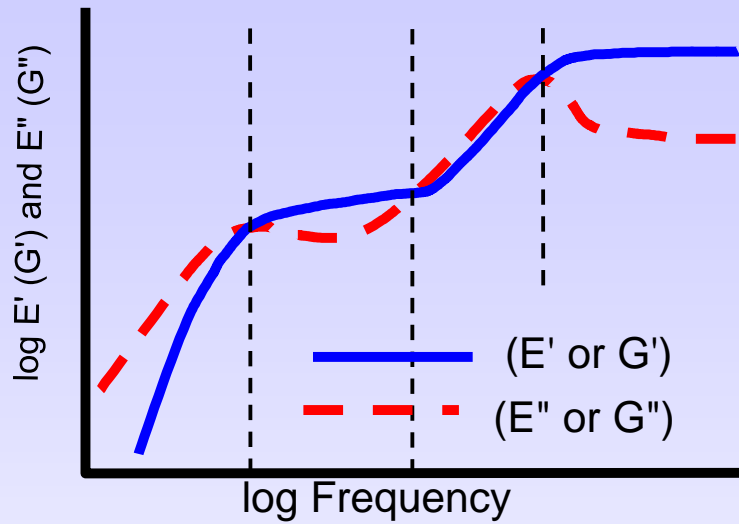


Smart materials & nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

Το Ιξωδοελαστικό Φάσμα



Smart materials & nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

Αρπάγες



3-Point Bending



Tension-Film



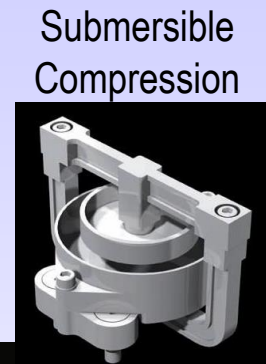
Tension-Fiber



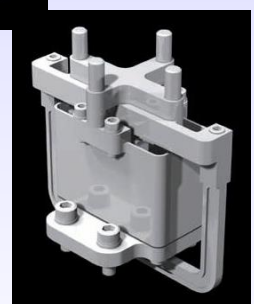
Shear-Sandwich



Compression



Submersible
Compression



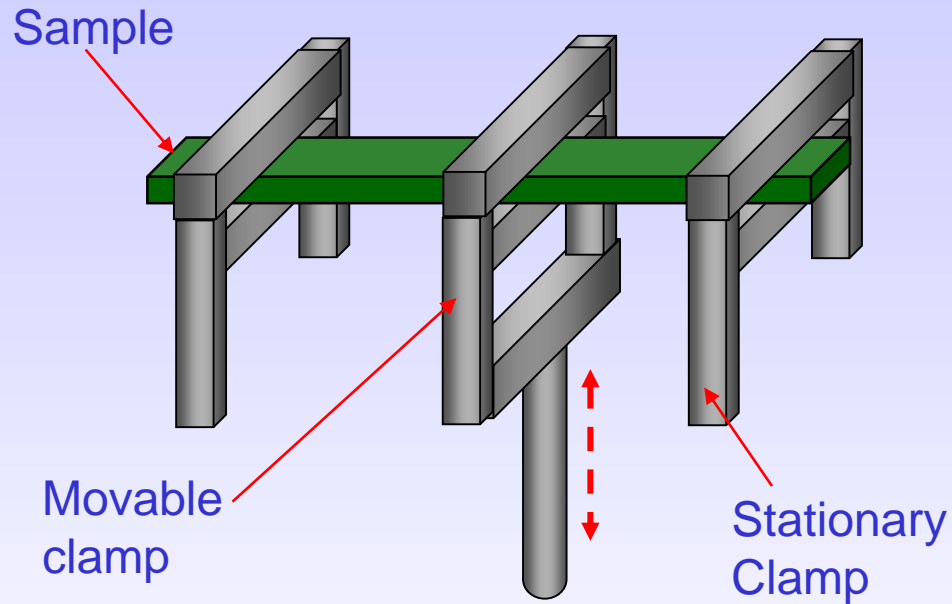
Submersible
Tension

Smart materials &
nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

DMA : Dual Cantilever Mode

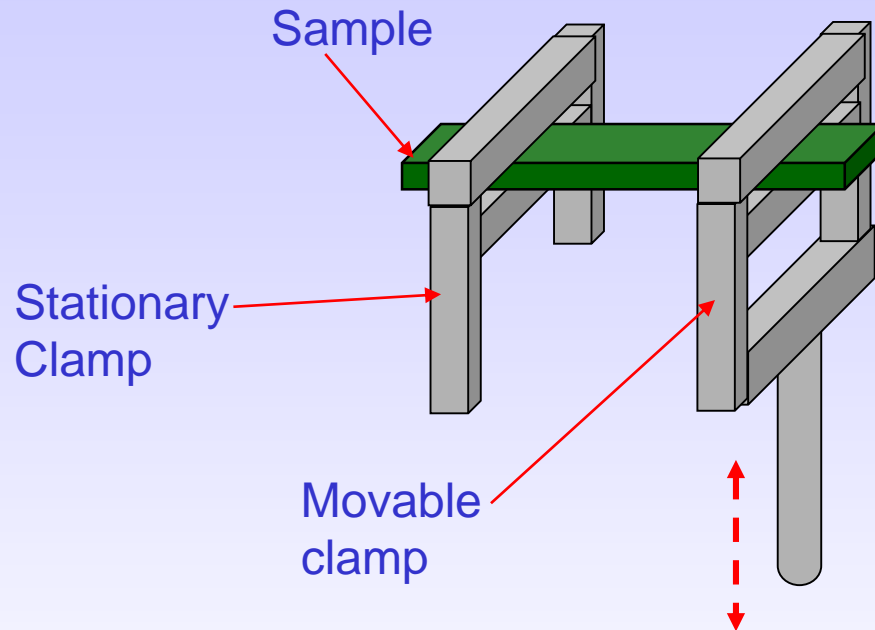


Smart materials &
nanodielectrics-lab

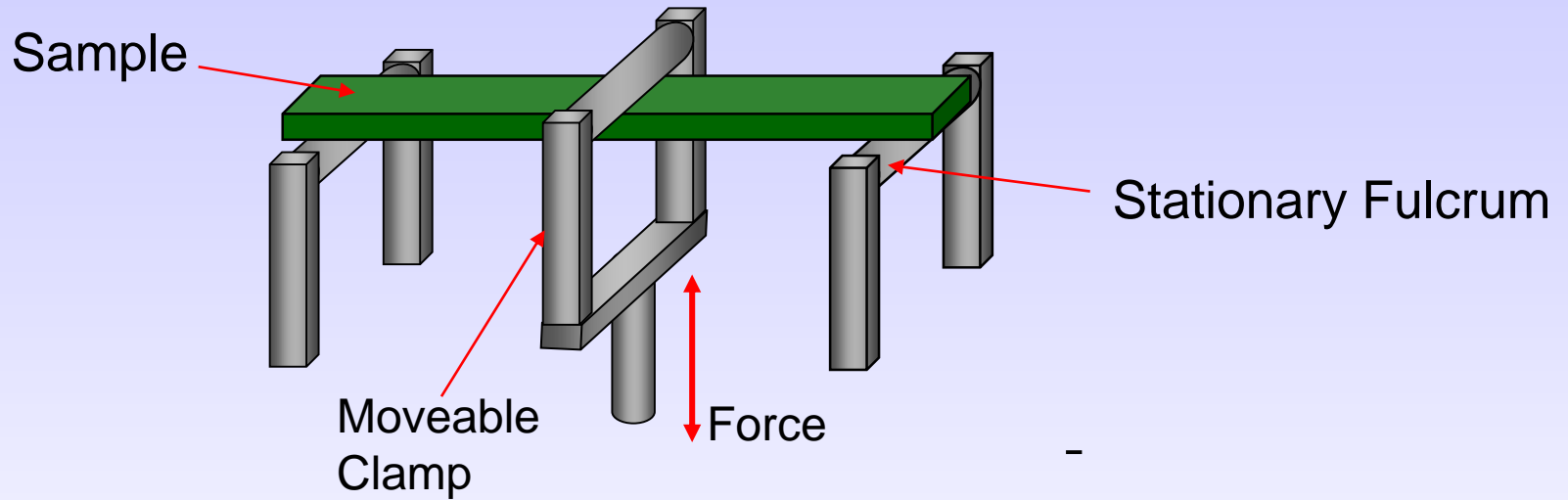
σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

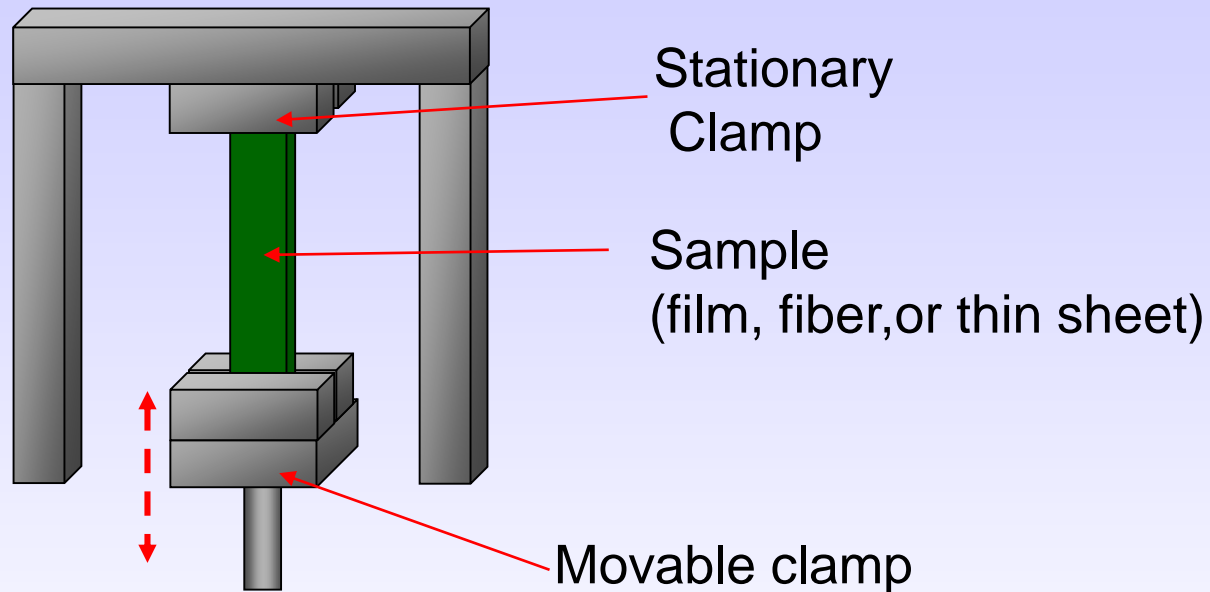
DMA : Single Cantilever Mode



DMA : Κάμψη Τριών Σημείων

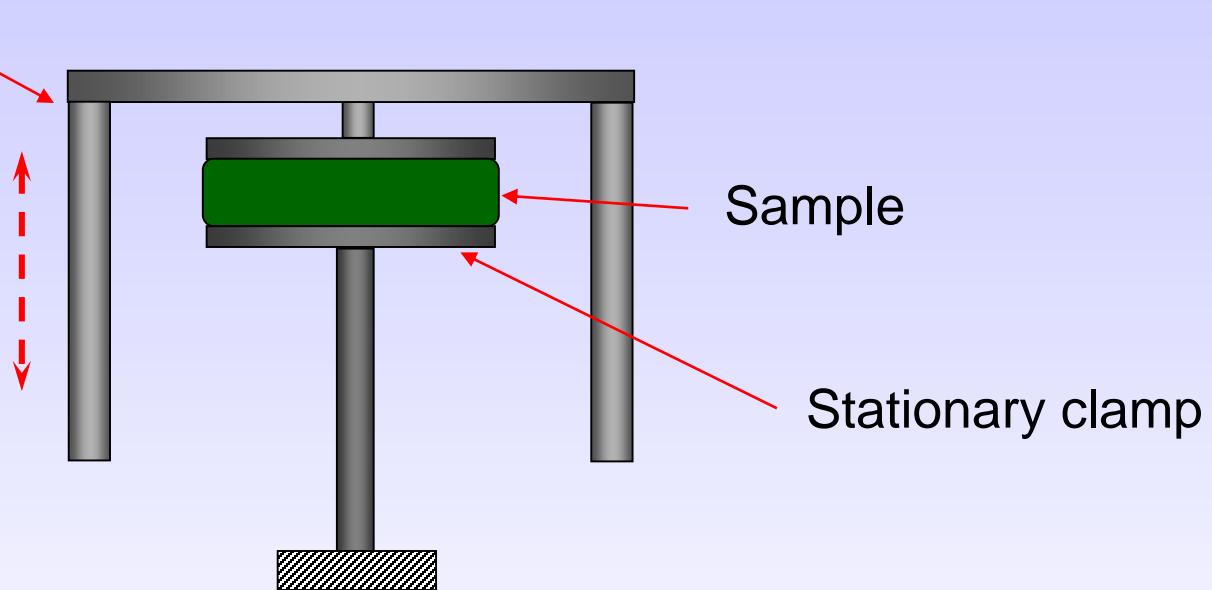


DMA : Αρπάγες Εφελκυσμού



DMA : Αρπάγες Θλίψεως

Movable Clamp



Μοριακές Κινήσεις/Μεταβάσεις/Χαλαρώσεις

- Γενικά, οι μεταβάσεις σχετίζονται με διαφορετικές κινήσεις μοριακών τμημάτων, που μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους και που είναι εντοπισμένες τοπικά ή εκτείνονται σε μέσο ή μεγαλύτερο εύρος.
- Αυτές οι κινήσεις αναφέρονται και ως χαλαρώσεις.

Reference: Turi, Edith, A, Thermal Characterization of Polymeric Materials, Second Edition, Volume I., Academic Press, Brooklyn, New York, P. 486.

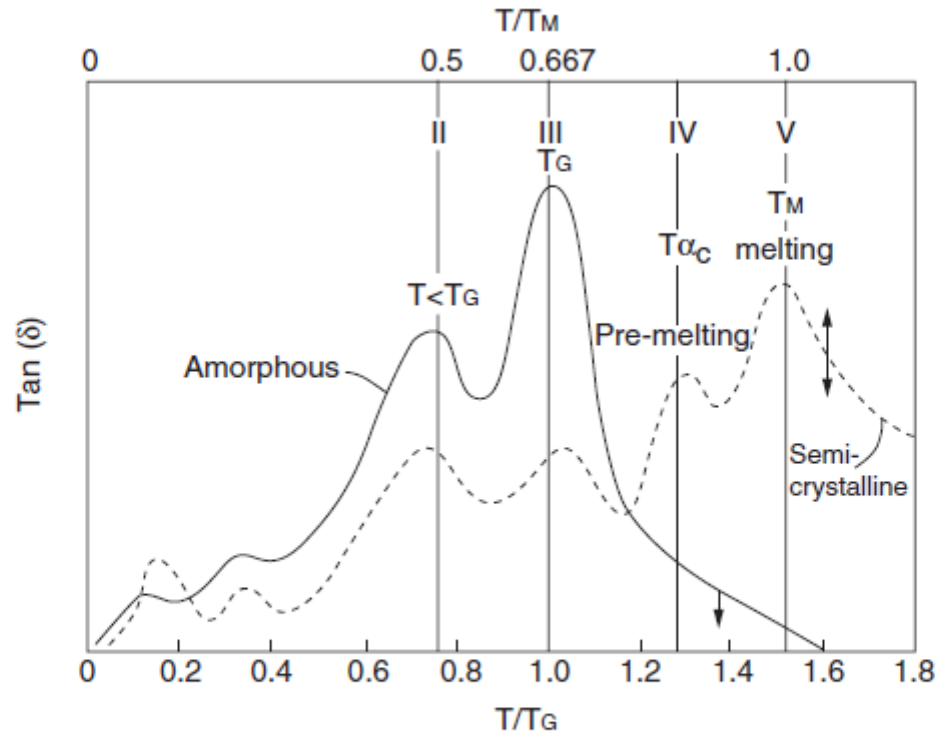


Figure 5.18. This diagram illustrates the loss peaks associated with the various transitions found in semicrystalline and amorphous polymers. [From Chartoff (1997); reprinted with permission of Elsevier.]

Σημεία μεγάλου ενδιαφέροντος για τον χαρακτηρισμό διεργασιών χαλάρωσης: (α) προσδιορισμός της φάσης στην οποία εκκινούν, (β) περιγραφή των υποκείμενων μοριακών διεργασιών, (γ) σύνδεση της συμπεριφοράς χαλάρωσης με τεχνικές ιδιότητες και πρακτικές εφαρμογές.

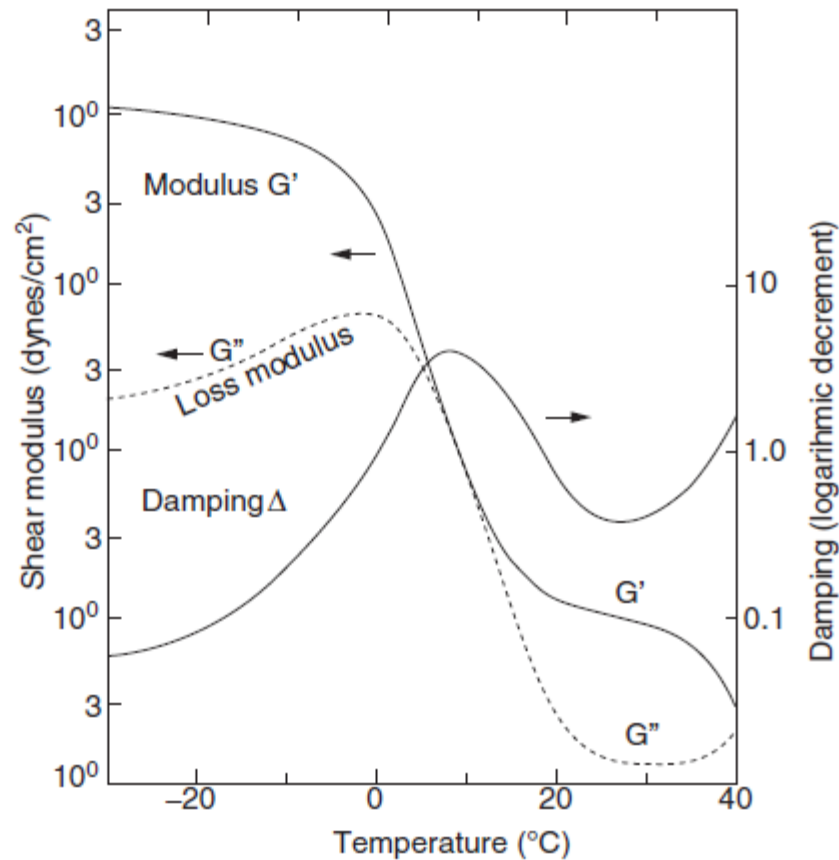


Figure 5.19. DMA E' , E'' , and $\tan \delta$ (Δ) curves for a butadiene–styrene copolymer; the data illustrate that E'' and $\tan \delta$ have different maxima (Nielsen 1962).

T_g , η κορυφή του E'' , “the onset point”, έναρξη της μετάβασης.
 T_g , η κορυφή του $\tan \delta$, “the softening point”, κοντά στο μέσον του θερμοκρασιακού εύρους μετάβασης και του σημείου καμψής, η μετάβαση έχει σχεδόν ολοκληρωθεί.

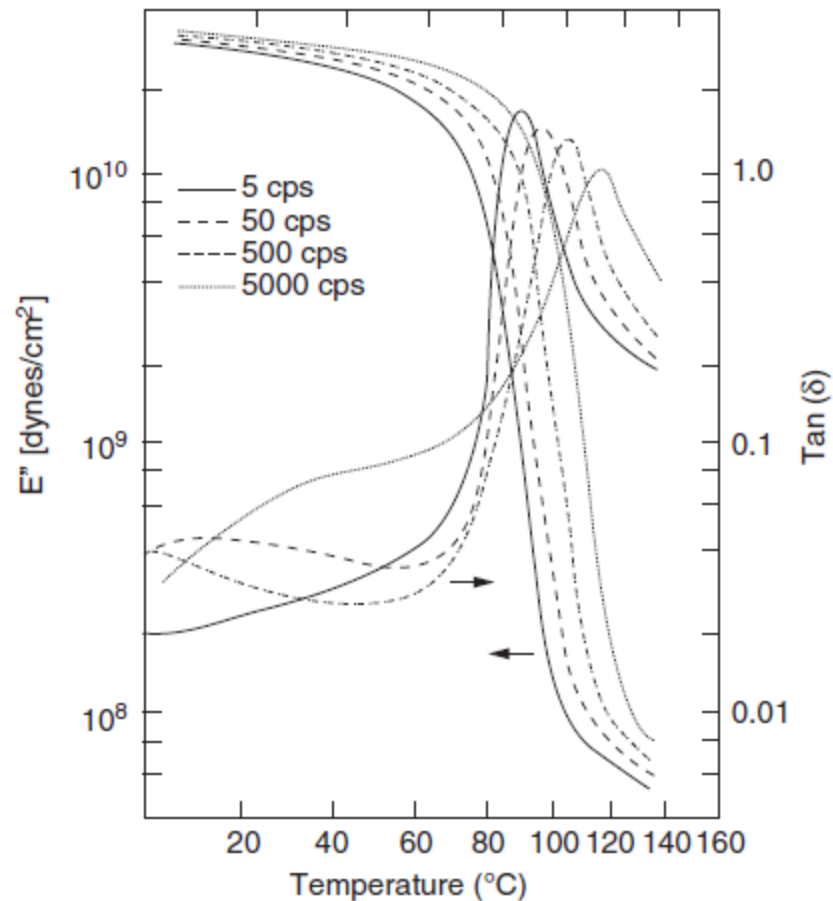


Figure 5.21. Experimental DMA data for PVC at various frequencies; a general decrease in the intensity of $\tan \delta$ or E'' , a broadening of the loss peak, and a slight decrease of the slope of the storage modulus curve in the transition region occur with increasing frequency (from Becker, 1955, with permission of Springer Science and Business Media).

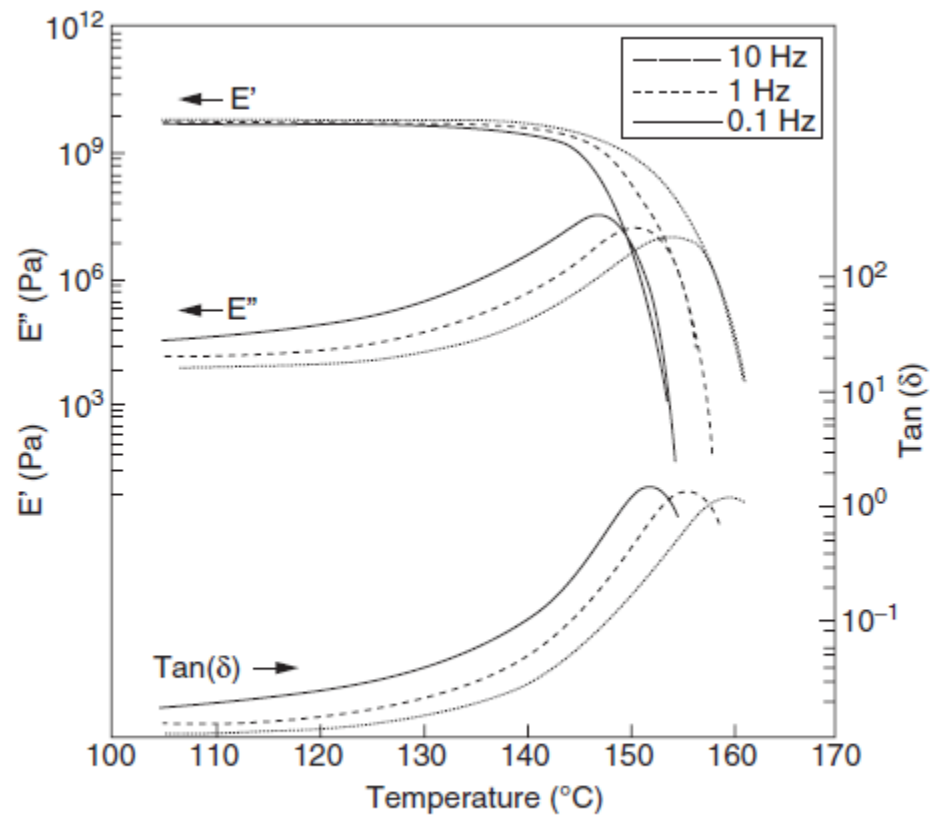


Figure 5.22. DMA curves for polycarbonate at several frequencies. [From Chartoff (1997); reprinted with permission of Elsevier.]

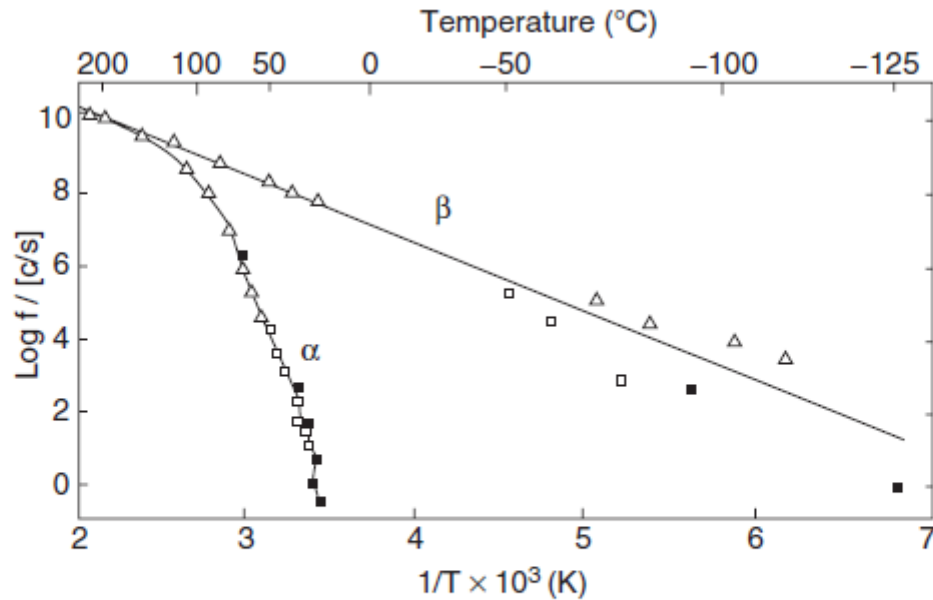


Figure 5.23. Arrhenius plots for the α and β transitions in poly(methyl acrylate) indicating the different temperature dependences for the two transitions. [From McCrum et al. (1967); reprinted with permission of John Wiley and Sons, Inc.]

$$f_{\max} = f_0 \exp\left(-\frac{E_A}{k_B T}\right)$$

$$f_{\max} = f_0 \exp\left(-\frac{AT_0}{T - T_0}\right)$$

$$\tau_{\max} = \tau_0 \exp\left(\frac{E_A}{k_B T}\right)$$

$$\tau_{\max} = \tau_0 \exp\left(\frac{AT_0}{T - T_0}\right)$$

Smart materials &
nanodielectrics-lab

$\sigma\mu\alpha\tau$ -lab

smatlab.upatras.gr

R. P. Chartoff, J. D. Menczel, S. H. Dillamn, **Dynamic Mechanical Analysis (DMA)** in J. D. Menczel, R. B. Prime, eds, **Thermal Analysis of Polymers**, p. 387-495, Wiley, 2009.

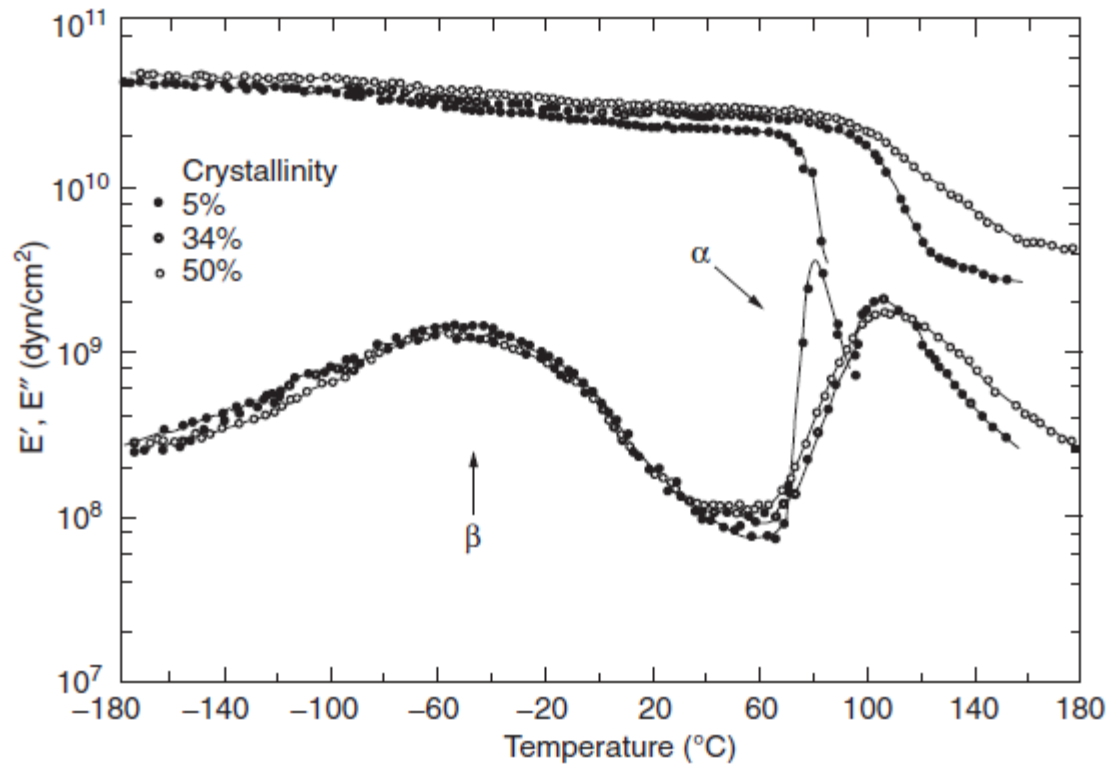


Figure 5.24. An example of the broadening of the glass transition in semicrystalline PET; the low-crystallinity sample exhibits glass transition relaxation at 75°C, while the higher-crystallinity samples show the relaxation around 105°C. As crystallinity increases, the relaxation broadens and the loss peak shifts to higher temperatures (from Takayanagi, 1965).

Επίδραση της κρυσταλλικότητας στο T_g

Smart materials &
nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

R. P. Chartoff, J. D. Menczel, S. H. Dillamn, *Dynamic Mechanical Analysis (DMA)* in J. D. Menczel, R. B. Prime, eds, *Thermal Analysis of Polymers*, p. 387-495, Wiley, 2009.

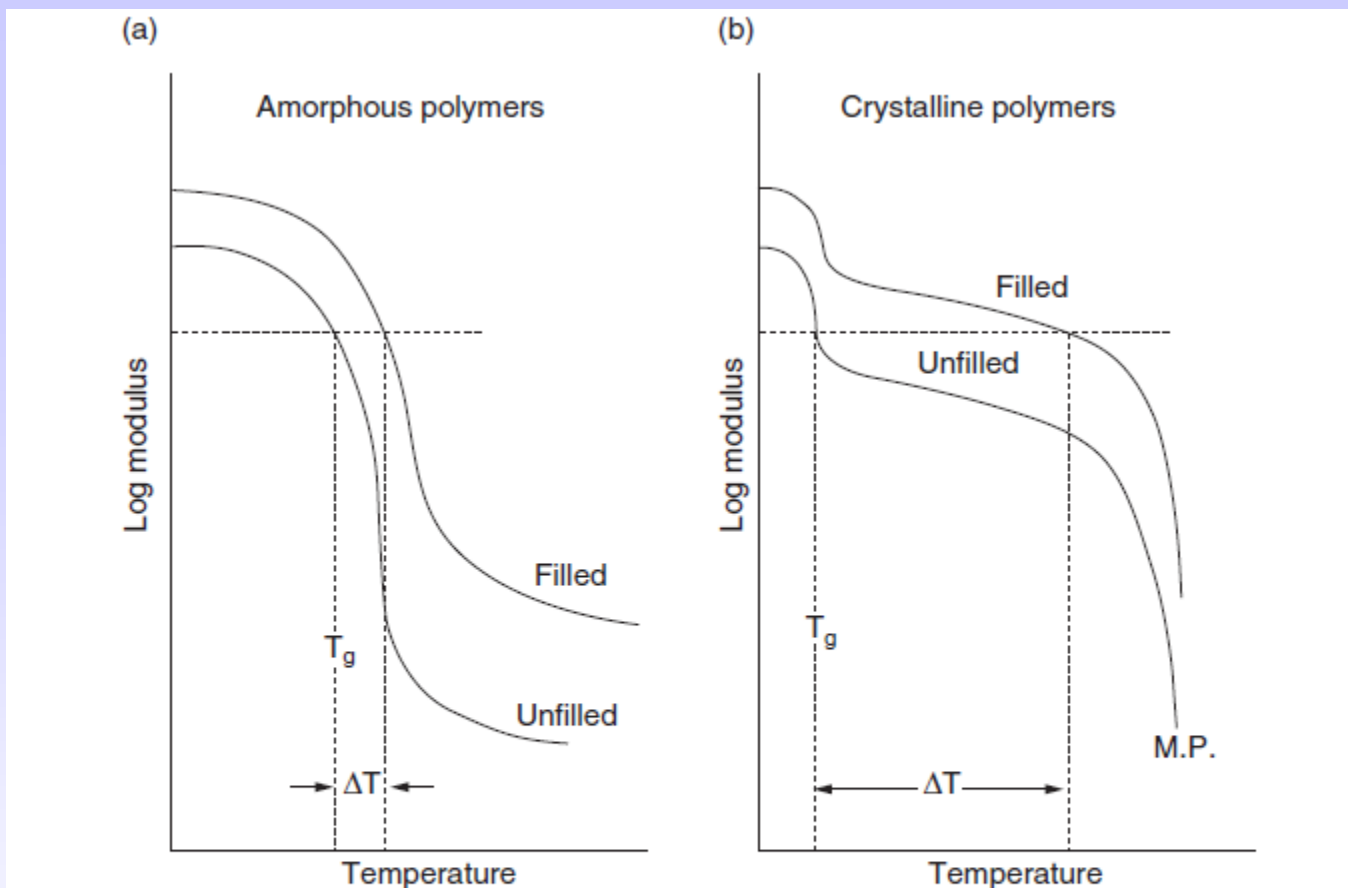


Figure 5.27. Schematic illustration of the effect of rigid particulate fillers on the storage modulus of amorphous and crystalline polymers in the vicinity of T_g ; fillers increase the storage modulus E' and shift the T_g to a higher temperature; the glass transition $\tan \delta$ peak (not shown) broadens and the peak position shifts to a higher temperature. [From Lee and Nielsen (1977); reprinted with permission of John Wiley and Sons, Inc.]

Κοκκώδη Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας

Smart materials &
nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

R. P. Chartoff, J. D. Menczel, S. H. Dillam, *Dynamic Mechanical Analysis (DMA)* in J. D. Menczel, R. B. Prime, eds, *Thermal Analysis of Polymers*, p. 387-495, Wiley, 2009.

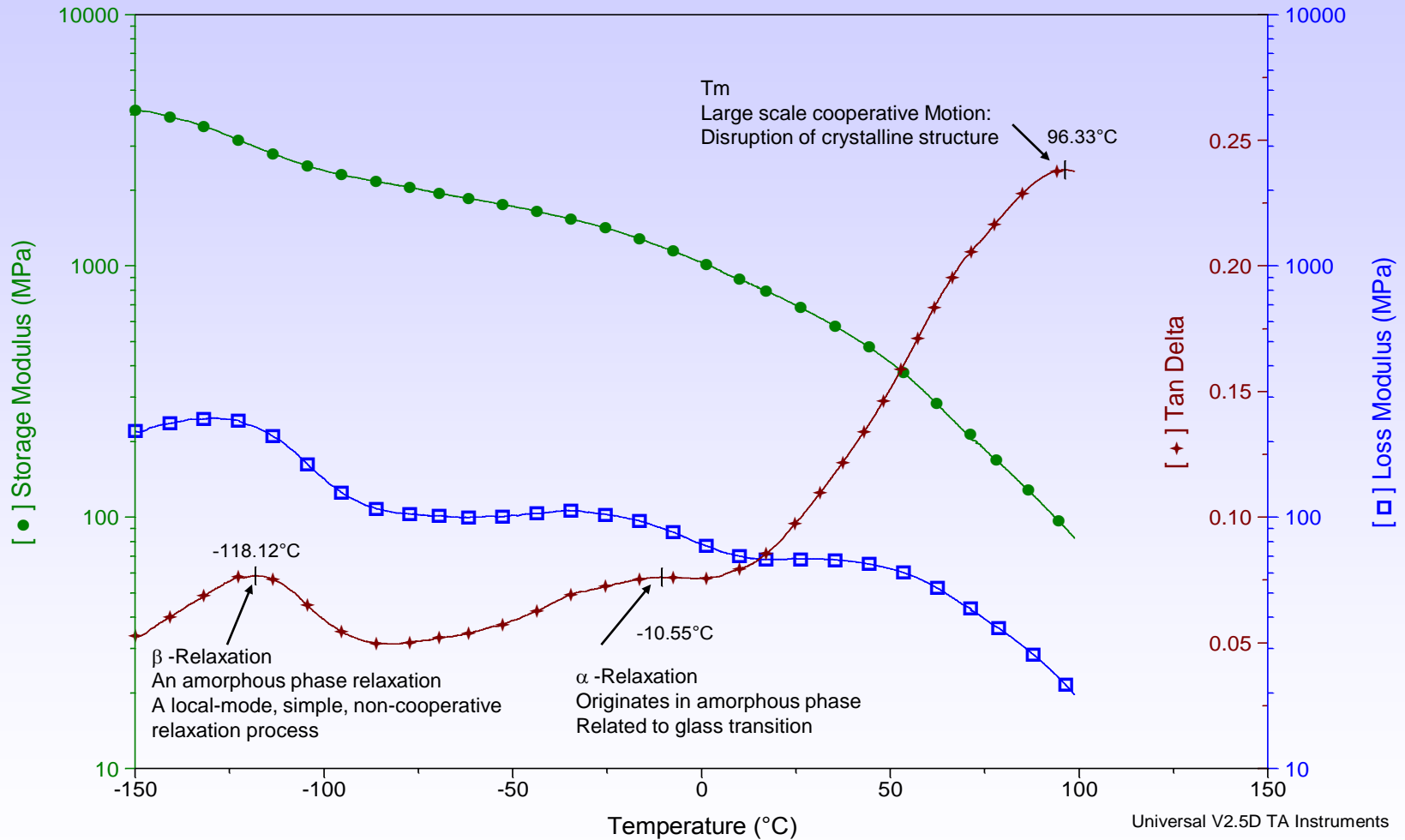
LDPE: Χαλαρώσεις α και β τάξεως (α', β')

Sample: Polyethylene in Tension
Size: 8.4740 x 5.7500 x 1.0000 mm

DMA

File: F:\...DMADATA\Peten.tr1
Operator: RRU
Run Date: 18-Jan-99 16:10

Comment: 15 microns, 120% Autostrain, -150°C to 100°C



Smart materials & nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

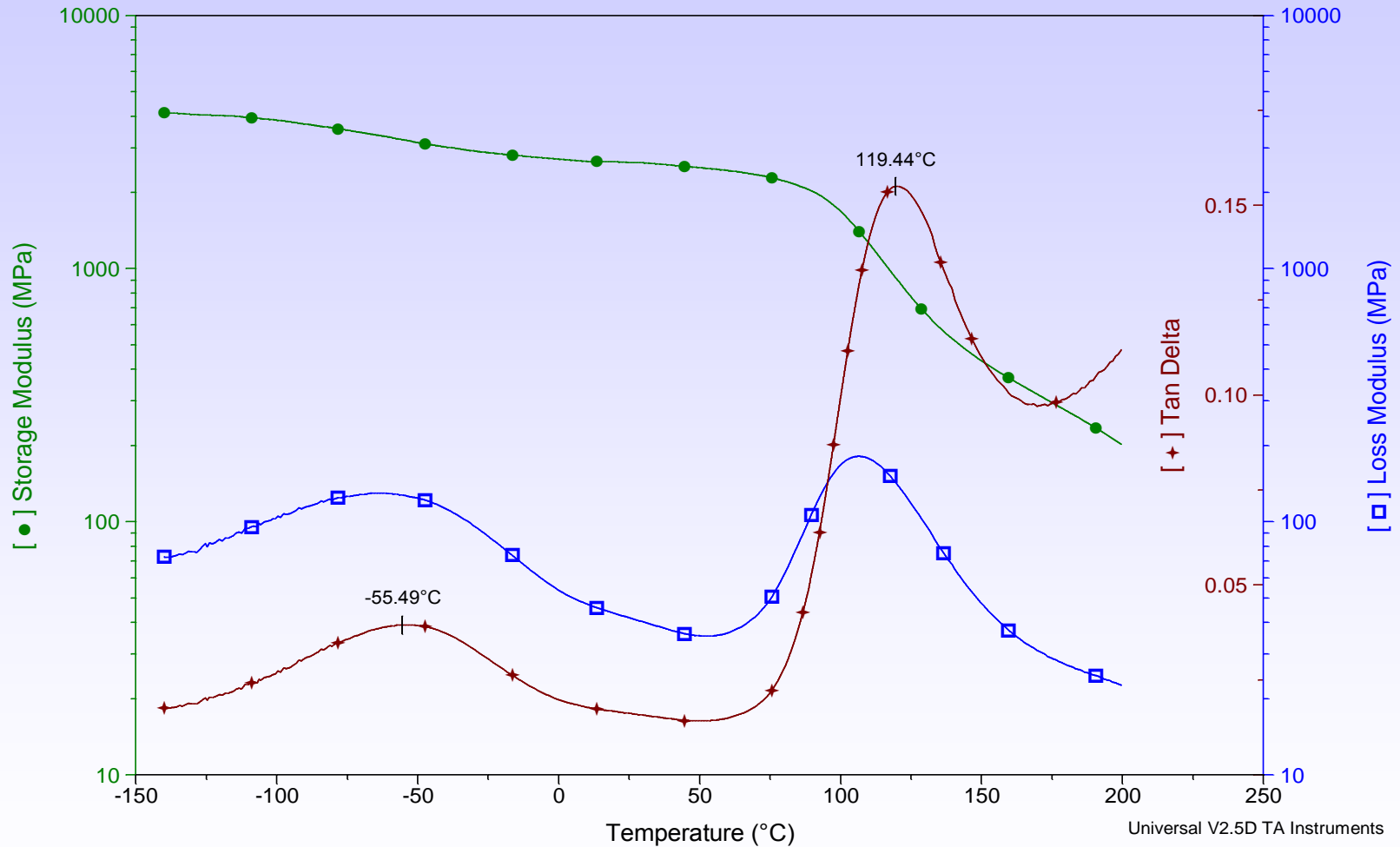
smatlab.upatras.gr

Χαλαρώσεις α και β τάξεως (α', β')

Sample: PET Film in Machine Direction
Size: 8.1880 x 5.5000 x 0.0200 mm
Method: 3°C/min ramp
Comment: 1Hz; 3°C/min from -140° to 150°C, 15 microns,

DMA

File: A:\Petmd.001
Operator: RRU
Run Date: 27-Jan-99 13:56



Smart materials & nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

Zytel - Nylon in Torsion

Temperature Ramp at 3°C/min.

Frequency = 1 Hz

Strain = 0.025%

G'

G''

$\tan \delta$

Melt Peak
210°C

α - transition
 $T_g = 81.6^\circ\text{C}$

γ - transition
 -140.3°C

β - transition
 -70.8°C

Degradation

temperature

Smart materials &
nanodielectrics-lab

$\sigma\mu\alpha\tau$ -lab

smatlab.upatras.gr

Δομή Πολυμερών – Ιδιότητες Χαρακτηρισμός

- ⇒ Υαλώδης Μετάπτωση
- ⇒ Μεταβάσεις β' τάξεως (β' χαλαρώσεις)
- ⇒ Κρυσταλλικότητα
- ⇒ Μοριακό βάρος/σταυροδεσμοί
- ⇒ Διαχωρισμός φάσεων (πολυμερικά μείγματα, συμπολυμερή,...)
- ⇒ Σύνθετα
- ⇒ Γήρανση
- ⇒ Σκλήρυνση (curing) δικτύων
- ⇒ Προσανατολισμός
- ⇒ Επίδραση προσθετικών

Reference: Turi, Edith, A, Thermal Characterization of Polymeric Materials, Second Edition, Volume I., Academic Press, Brooklyn, New York, P. 489.

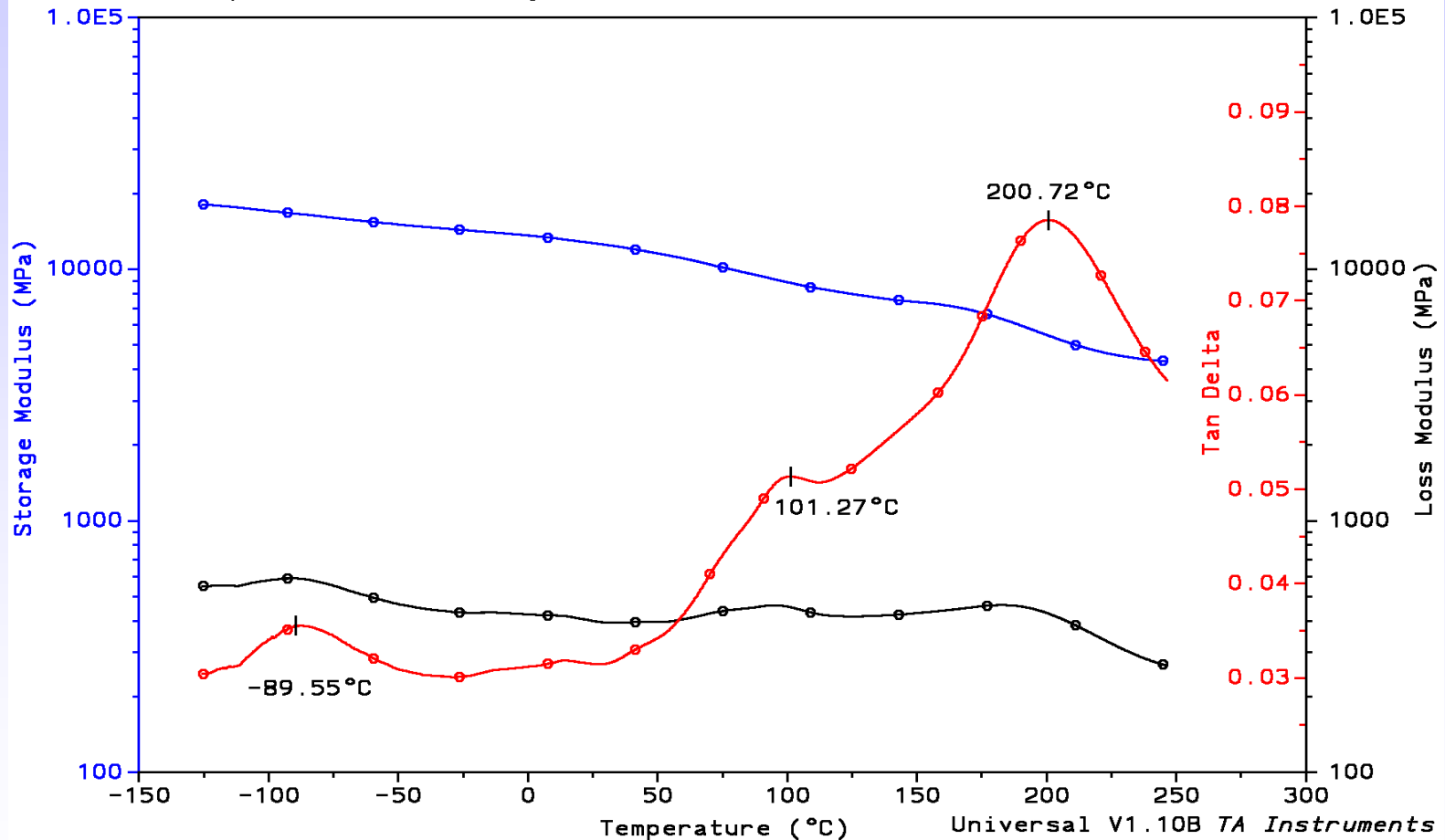


Σύνθετο Ινών Βινυλεστέρα – β' χαλάρωση

Sample: Filled Fiber Rein. Composite
Size: 50.0000 x 13.1100 x 3.2100 mm
Method: 5 Deg/min
Comment: Compression molded vinylester resin

DMA

File: A:\PREMIXD.000
Operator: Russell Ulbrich
Run Date: 12-Jun-97 13:56

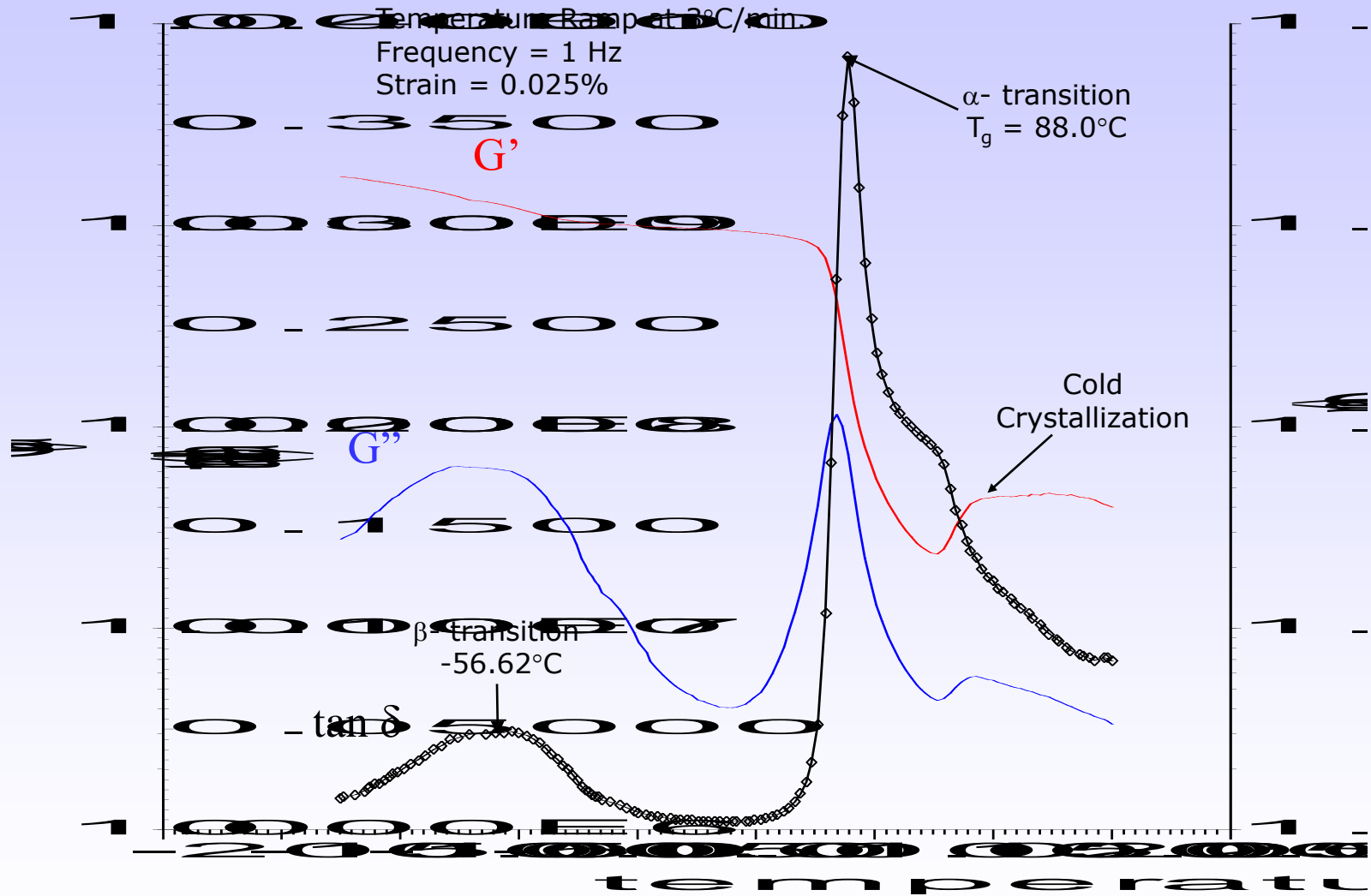


Smart materials & nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

PET - Polyethylene terephthalate



Smart materials &
nanodielectrics-lab

$\sigma\mu\alpha\tau$ -lab

smatlab.upatras.gr

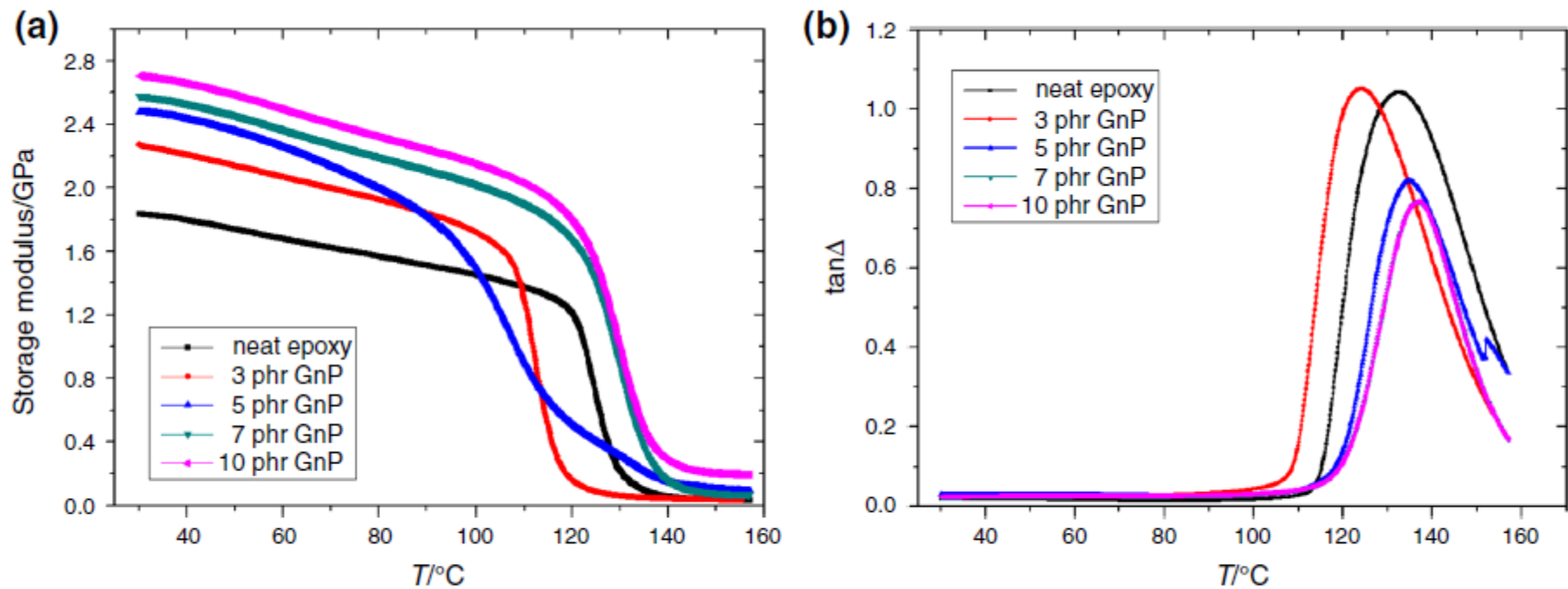


Fig. 2 a Storage modulus and b loss tangent delta as a function of temperature, at $f = 1$ Hz, of all the studied systems

Dynamic electrical thermal analysis on zinc oxide/epoxy resin nanodielectrics,
G. N. Mathioudakis, A. C. Patsidis, G. C. Psarras,
Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,
116, 27-33, 2014.

Fig. 4 Storage modulus and mechanical loss factor of PUR and PUR/alumina nanocomposite (in 10 phr filler loading) versus temperature (in tension mode at 10 Hz frequency). Note that the *line* represents the neat PUR whereas *line plus symbol* the PUR reinforced with nanoparticles of 25 nm in diameter

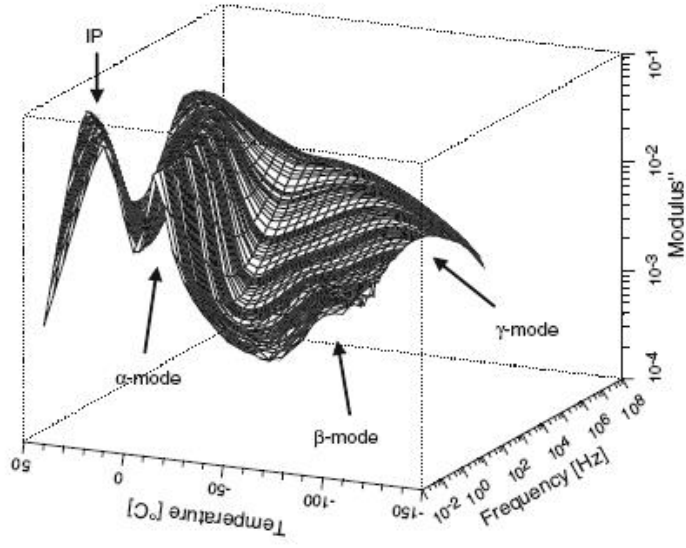
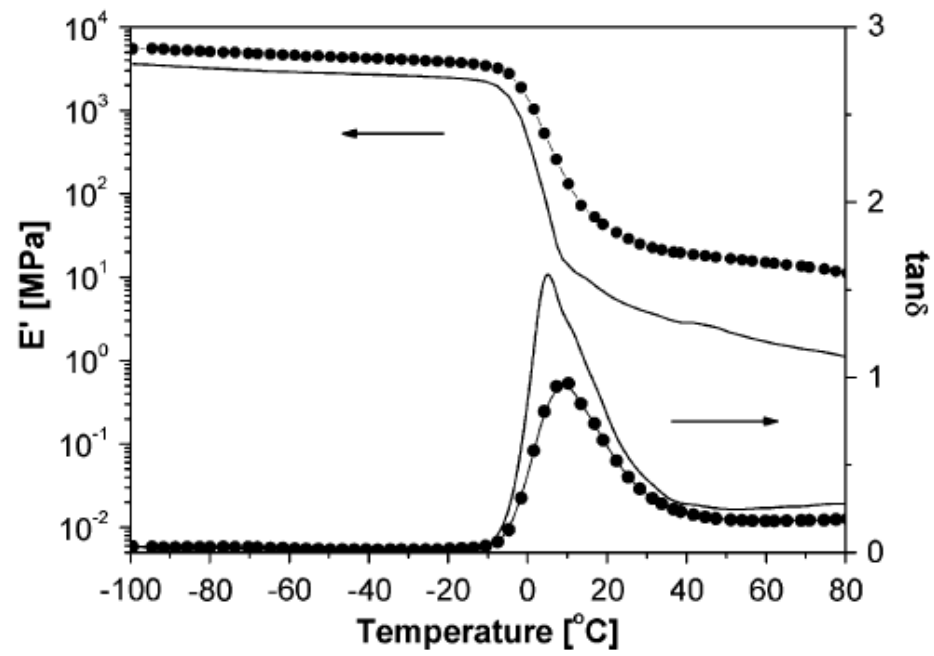


Fig. 7 Imaginary part of electric modulus versus frequency and temperature for pure PUR

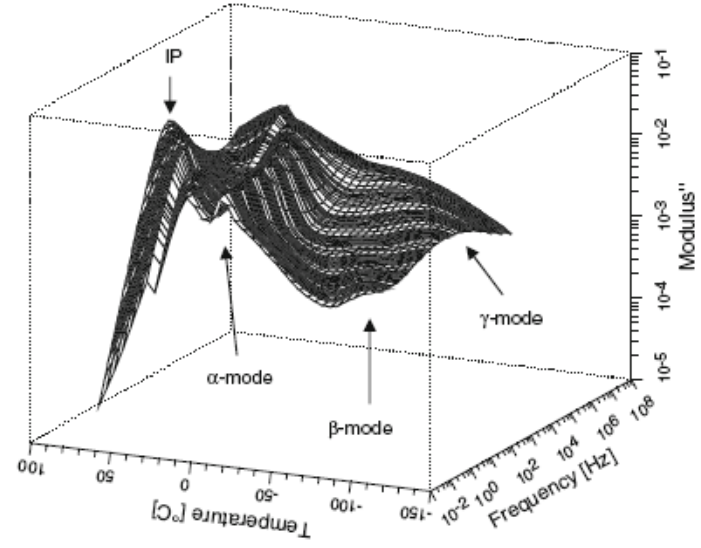


Fig. 9 Imaginary part of electric modulus versus frequency and temperature for PUR reinforced with 10 phr alumina particles. The mean diameter of alumina particles is 25 nm

Smart materials & nanodielectrics-lab
 σματ-lab
 smatlab.upatras.gr

Relaxation phenomena in elastomeric nanocomposites, G. C. Psarras K. G. Gatos, 89-118, in "Recent advances in elastomeric nanocomposites", edited by V. Mittal, J. K. Kim and K. Pal, Springer-Verlag, 2011.

Department of **Materials Science**
 UNIVERSITY OF PATRAS

Fig. 6 Storage modulus and mechanical loss factor of neat PUR/NR blend (line curve) and reinforced with 10 phr sodium fluorohectorite (line plus symbol curve) versus temperature (in tension mode at 10 Hz frequency)

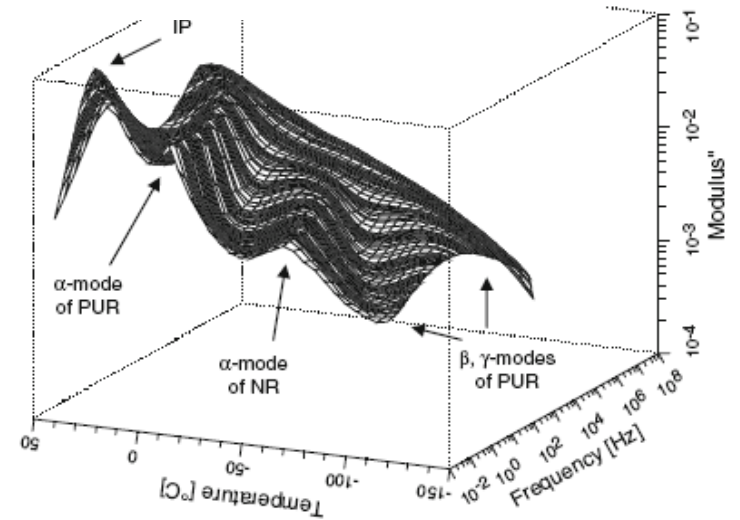
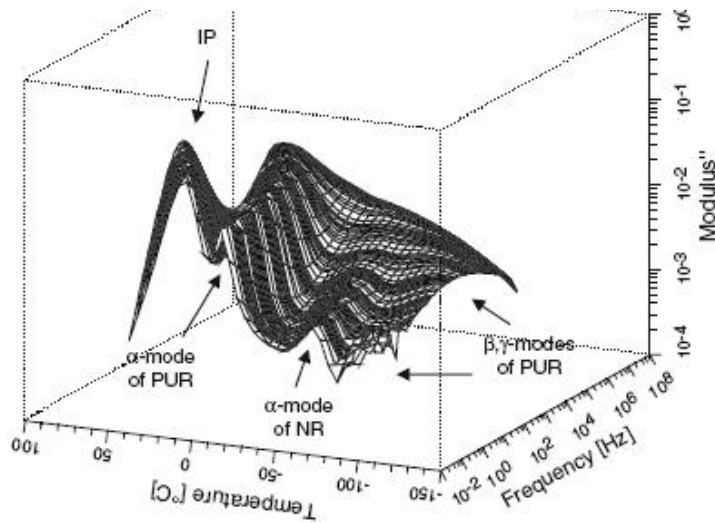
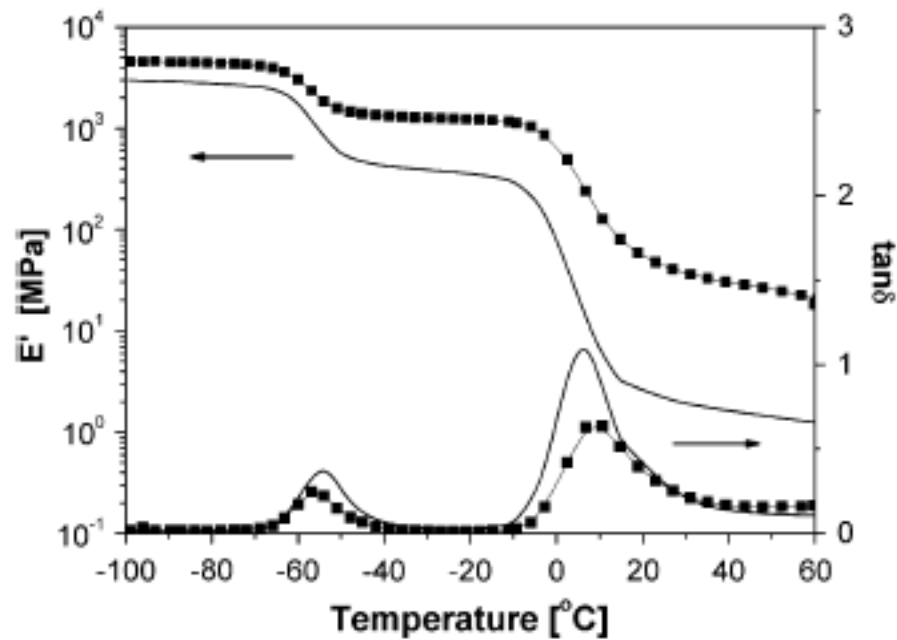


Fig. 8 Imaginary part of electric modulus versus frequency and temperature for PUR/NR blend **Fig. 12** Imaginary part of electric modulus versus frequency and temperature for PUR/NR/LS nanocomposite (in 10 phr filler loading)

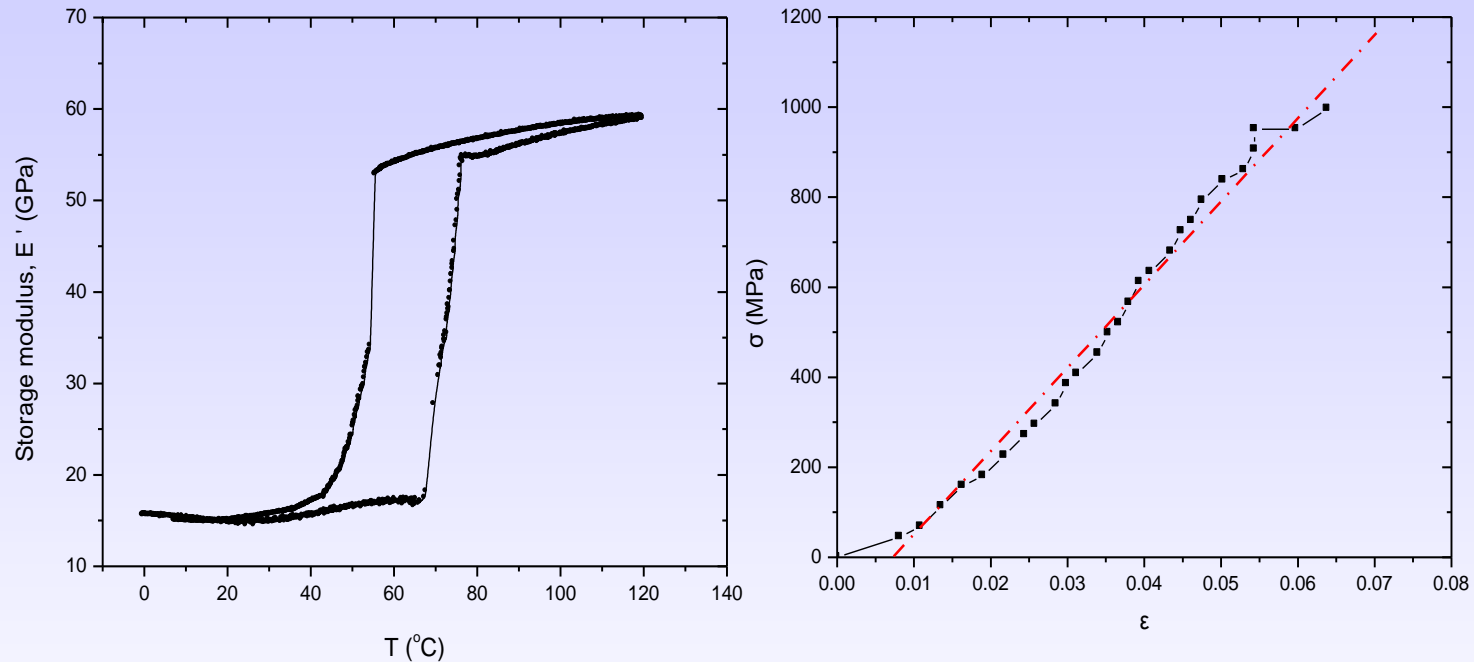
Smart materials & nanodielectrics-lab

σμιατ-lab

smatlab.upatras.gr

Relaxation phenomena in elastomeric nanocomposites, G. C. Psarras K. G. Gatos, 89-118, in "Recent advances in elastomeric nanocomposites", edited by V. Mittal, J. K. Kim and K. Pal, Springer-Verlag, 2011.

Μηχανική Απόκριση Κραμάτων Μνήμης Σχήματος – NiTiCu(12%)



Plain NiTiCu(12%). (a) Storage modulus as a function of temperature, (b) static stress-strain curve at ambient.

Thermoelastic response of epoxy resin-aramid fibres composites incorporating shape memory alloy wires. N. Makris, P. Petalis, N.-M. Barkoula, G. C. Psarras, 7th Mediterranean Conference on Calorimetry and Thermal Analysis (MEDICTA 2005), 2-6 July, Thessaloniki, Greece, p. 390-394, 2005.

Smart materials & nanodielectrics-lab

σμάτ-lab

smatlab.upatras.gr

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

1. W. Haase, S. Wróbel, Relaxation Phenomena, Springer, 2003.
2. S. Havriliak Jr, S. J. Havriliak, Dielectric and Mechanical Relaxation in Materials, Hanser, 1997.
3. T. Hatakeyama, F. X. Quinn, Thermal Analysis, John Wiley & Sons, 1994.
4. G. V. Vinogradov, A. Ya. Malkin, Rheology of Polymers, MIR, 1980.
5. I. Perepechko, Low-Temperature Properties of Polymers, MIR, 1980.
6. J. D. Ferry, Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley & Sons, 1980.
7. R. P. Chartoff, J. D. Menczel, S. H. Dillamn, Dynamic Mechanical Analysis (DMA) in J. D. Menczel, R. B. Prime, eds, Thermal Analysis of Polymers, p. 387-495, Wiley, 2009.

