

אופטיקה של חומרים דו-ממדים

נושאי הקורס

הערות	נושא	שבוע	+
	מבוא כללי לחומרים דו ממדיים, חזקה על משווהות הגלים בחומר, מודל לורן ויחסוטפטיות תלויות התדר של חומרים	1	
	מושגים בסיסיים במצב מוצק, מבנה פסים, יחס דיספרסיה.	2	
ת. בית 1	חזקה על מצב מוצק והקשר למבנה פסים, תגובה אופטית של חומרים Transfer-Matrix-Method (TMM)	3	
	מבוא לפולרייטונים, Surface-plasmon-polaritons	4	
	Graphene ומקדם החולכה האופטי של Graphene	5	
	פלזמוניים ב TMM , Graphene עבר פולרייטונים	6	
ת. בית 2	מוליכים לממחזה ואקסיטונים, פיזיקה של מוליכים לממחזה דו-ממדיים, Transition-Metal-Dichalcogenides (TMDs)	7	
	Surface-phonon-polaritons , Restrahlen band - hexagonal-boron-nitride	8	
	hBN ב Hyperbolic-Phonon-polaritons	9	
ת. בית 3	Valley physics, אקסיטונים-פולרייטונים	10	
	Surface-phonon-polaritons , Restrahlen band - hexagonal-boron-nitride	11	
	סיוור במעבדה + סיכום	12	
		13	

מרצה

ד"ר איתי אפשטיין

שעת קבלה : בתאום באימייל

דו"ר אלקטרוני : itaieps@tauex.tau.ac.il

מועדיו הרצאות

הרצאות : יום ה' , 15:00-17:00

- ההרצאות יונגשו בזום כולל הקלטות.

סיוור במעבדה לאנטראקצייה של אור עם חומרים דו-ממדיים

- יקבע במהלך הסמסטר

מדיניות ודרישות הקורס

יתנתנו 3 תרגילי בית עם חובת הגשה

מרכיבי הציון

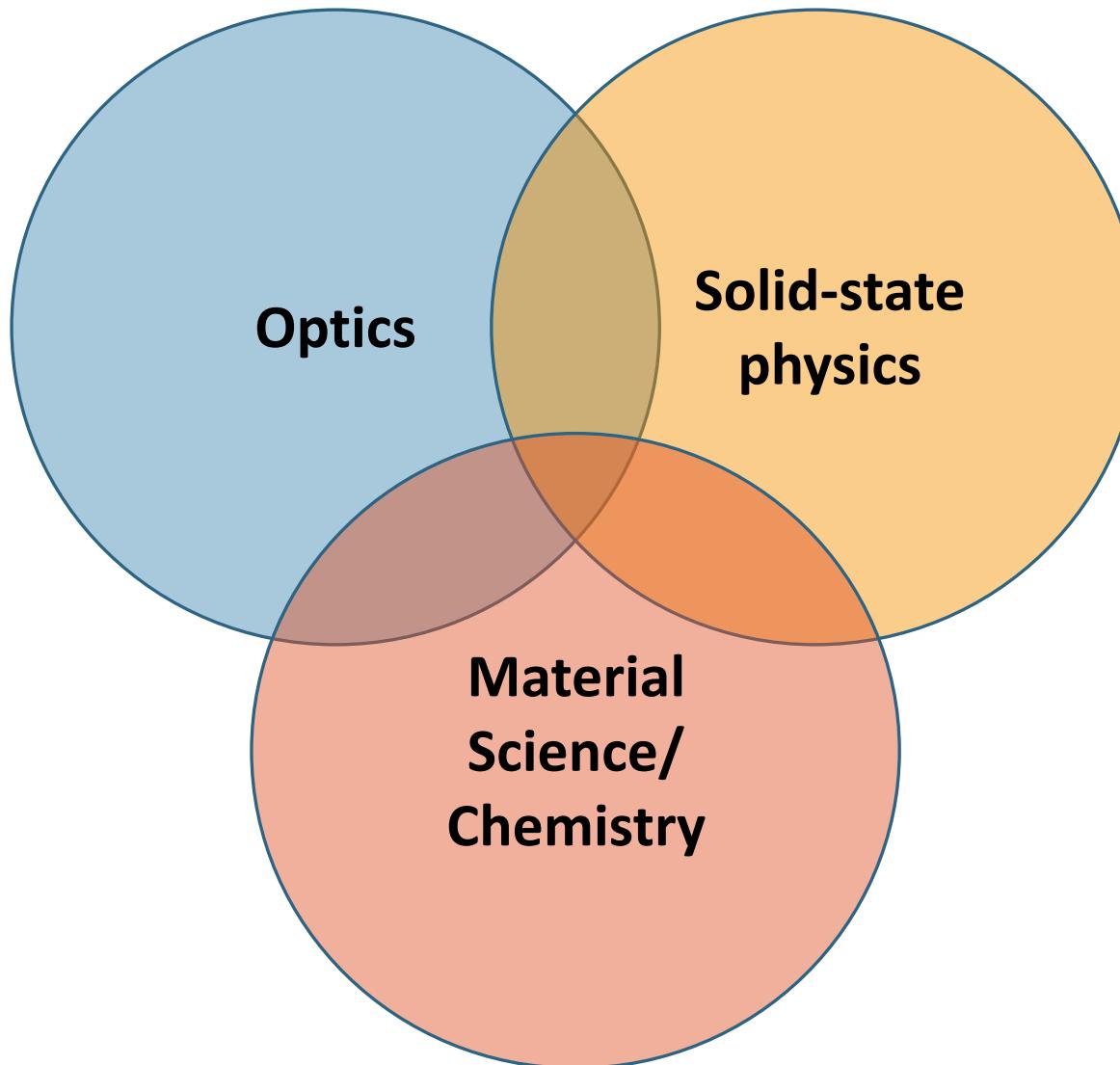
מרכיב	אחוז מהציון
תרג'il מסכם	40%
תרג'il בית	10%
מבחן	50%
סה"כ	100%



The Light-2D Matter-Interaction group

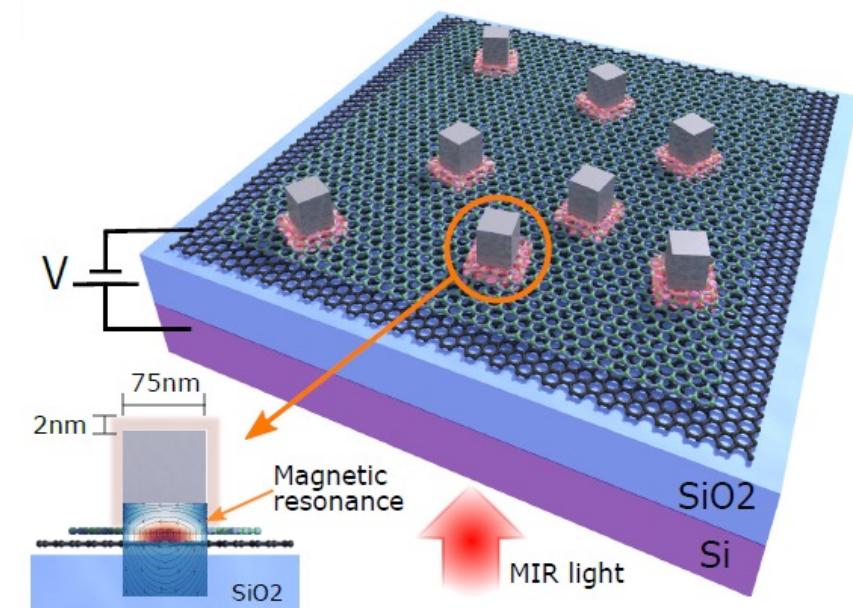
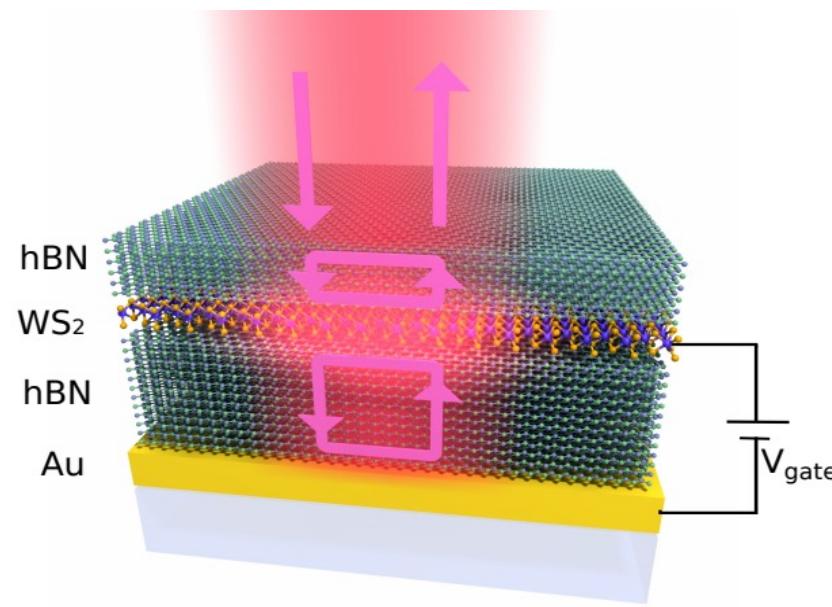
<https://www.epsteinlab.sites.tau.ac.il/>

אופטיקה של חומרים דו-ממדיים



אופטיקה של חומרים דו-מימדיים

Light-2D matter Interaction at the Atomic Scale

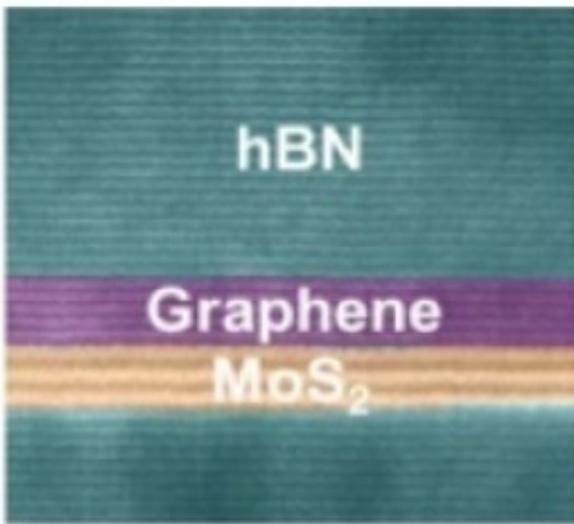


אופטיקה של חומרים דו-מימדיים - שיעור מס. 1

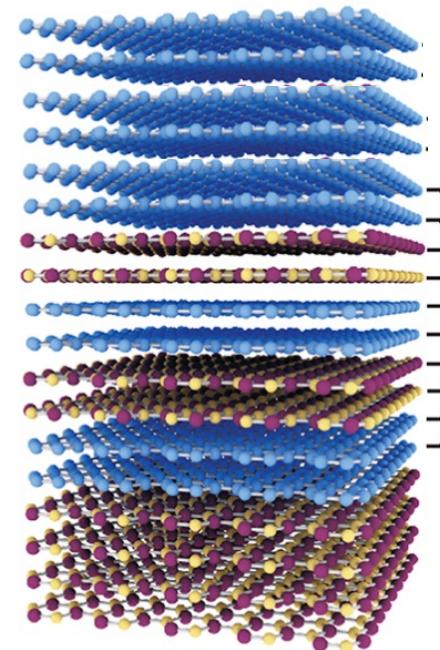
- מבוא כללי לחומרים דו-מימדיים.
- חזרה על עקרונות בסיסיים באופטיקה – יישור קו:
- התפשטות גלים אלקטромגנטיים בתוך חומר.
- הקשר בין מקדם שבירה, פרמייטיביות, סוספטאబיליות, מקדם ההולכה, וקטור הגל .
- מודל האויסילטור של לורנץ ומאפייני תגובה אופטית של חומרים.

2D materials

van der Waals heterostructures



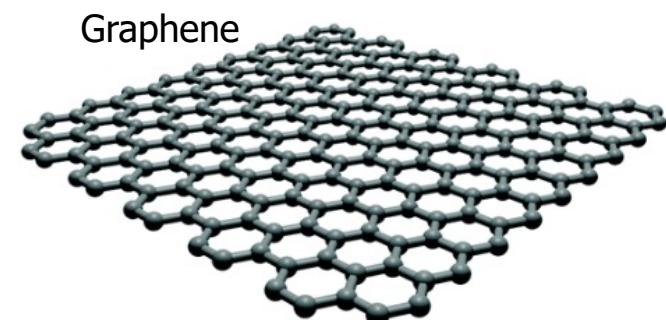
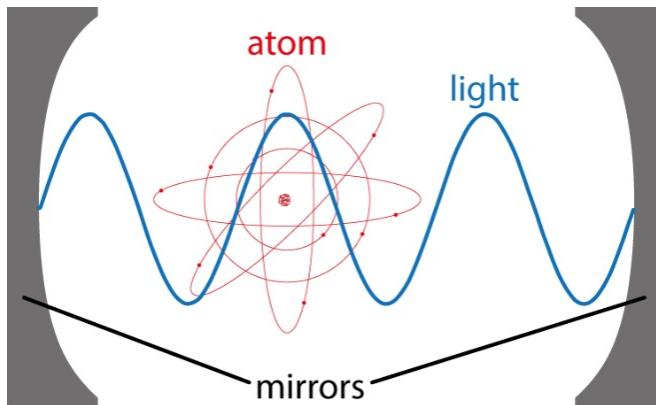
Hone et al, Nat. Nanotech. 2015



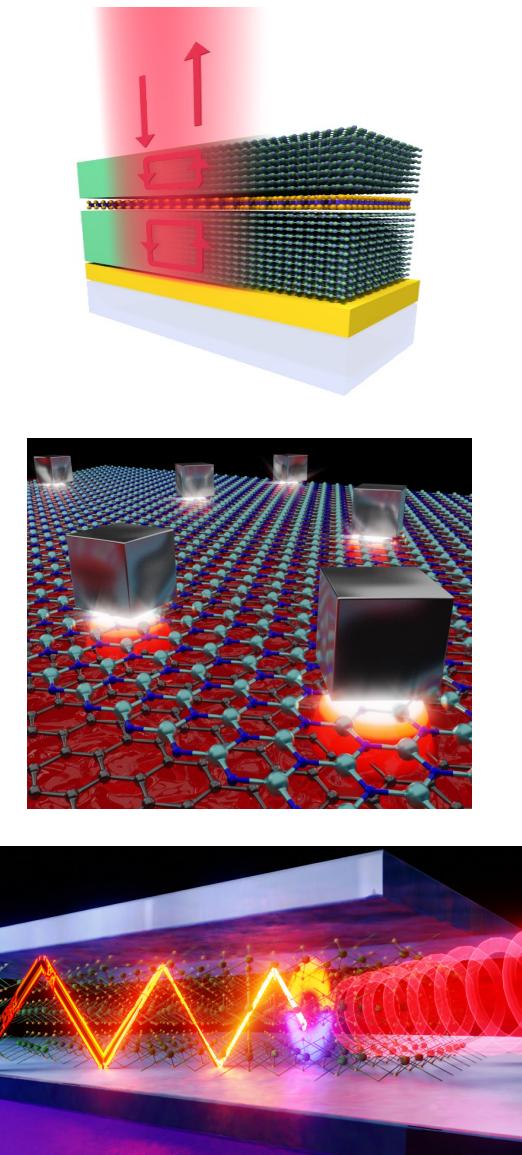
Novoselov et al, Science 2016

Motivation

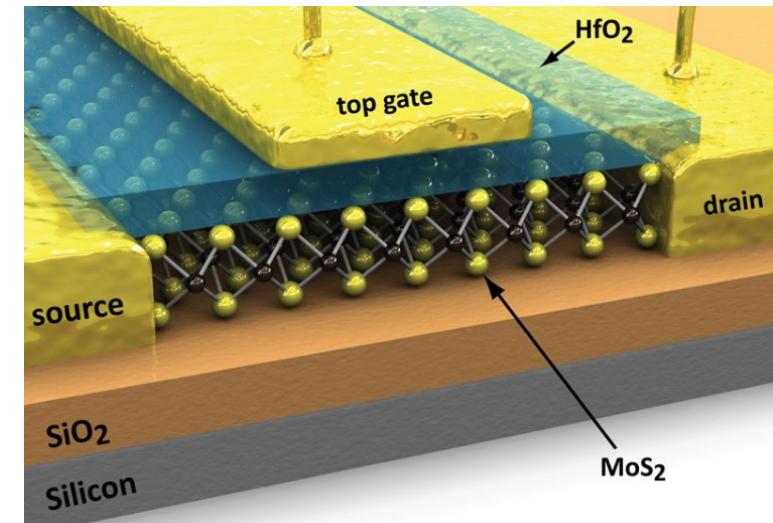
Fundamental



Chikkaraddy et al Nature 535, 127(2016)

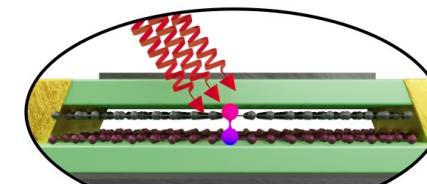


Applied - Optoelectronic devices

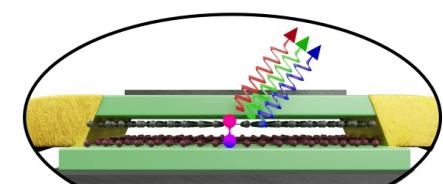


Transistor

Nat. Nano 6, 147 (2011)



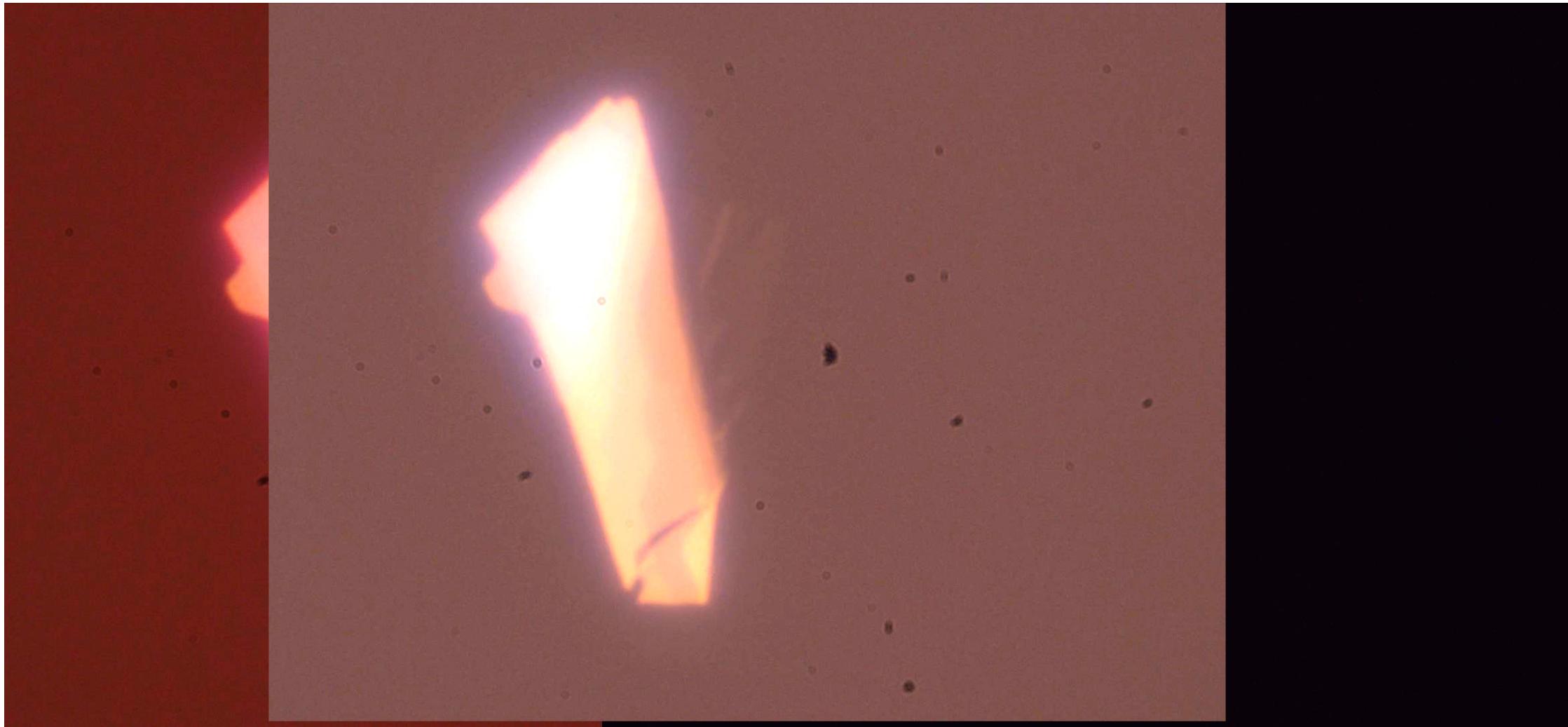
DETECTORS



SOURCES

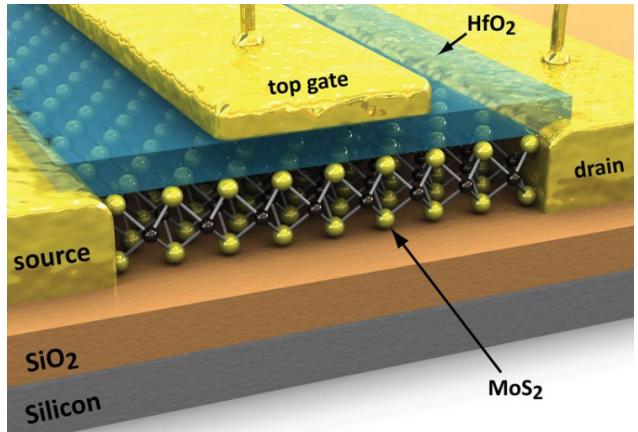
Why 2D materials?

Easy access and control at atomic scales



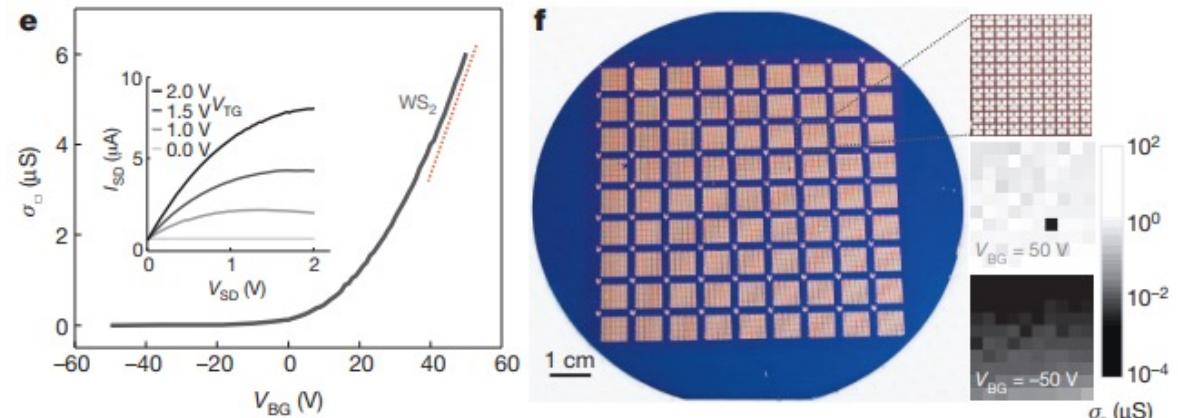
Why 2D materials?

Easy access and control at atomic scales



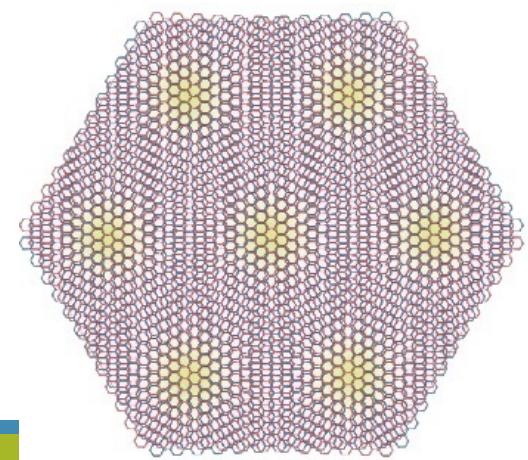
Transistors

Nat. Nanotech. 6, 147 (2011)



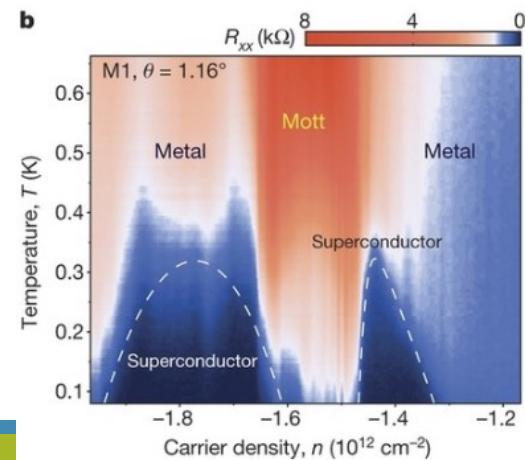
Photodetectors, modulators, LEDs, solar cells, etc

Nature 520, 656(2015)



Moiré

Nature 556, 43–50 (2018)



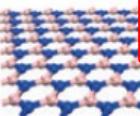
2D materials - optical response

Document set
DVD player

Frequency
 10^{17}

Ultraviolet

hBN
(insulator)



Bandgap:

hBN: ~6 eV

TMDC: ~1.0–2.5 eV

Graphene: zero-gap

Computational 2D materials database

C2DB
The Computational 2D Materials Database

Example: 'MoS2' OR 'gap>0,ehull<0.1'

Stoichiometry (A, AB₂, A₂B₃, ...):

Material class : All

Dynamically stable (phonons) : Yes

Dynamically stable (stiffness) : Yes

Thermodynamic stability : Medium - High

Magnetic : All

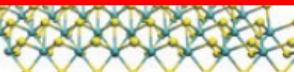
Band gap range [eV] : - PBE

Help with constructing advanced search queries ...
Toggle list of keys ...

Displaying rows 1-25 out of 1616 (direct link)

Rows: 25 Add Column

Formula	Material class	Space group	Magnetic	Heat of formation	Band gap	Crystal type
Ag ₂ F ₄	-	P2_1/c	True	-1.222	0.004	AB ₂ -14-be
As ₄ O ₆	-	P2_1	False	-1.215	3.876	A ₂ B ₃ -4-a
As ₄ S ₆	-	Pc	False	-0.140	2.272	A ₂ B ₃ -7-a
Cr ₂ F ₄	-	P2_1/c	True	-2.329	1.396	AB ₂ -14-be





Xia et al, Nat. Phot. 8, (2014)

6

תזכורת – משוואת הגלים

Maxwell's equations.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Coulomb's law

No magnetic monopoles

Faraday's law

Modified Ampère's law

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu_0\mu_r \quad \mu_r = 1$$

Permeability, material property

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$$

ϵ = Permittivity, material property

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \quad \epsilon_r = 1 + \chi_e$$

Susceptibility, material property

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} = \epsilon_0(1 + \chi_e) \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)) = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{B}) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{H}) = -\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{a} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{a}) - \nabla^2 \mathbf{a}$$

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)) - \nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = -\omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r(\omega) \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)$$

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r(\omega) \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = 0$$

משוואת הגלים

תזכורת – משוואת הגלים

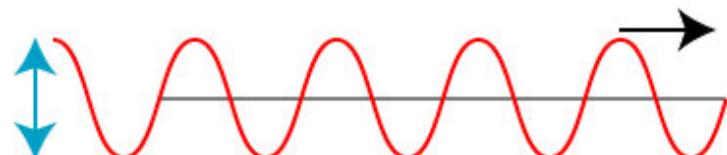
$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r(\omega) \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = 0$$

משוואת הגלים

$$\nabla^2 \mathbf{a} + k^2 \mathbf{a} = 0 \quad \text{Helmholtz equation}$$

$$k(\omega)^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r(\omega) \quad \text{Wavevector (momentum)}$$

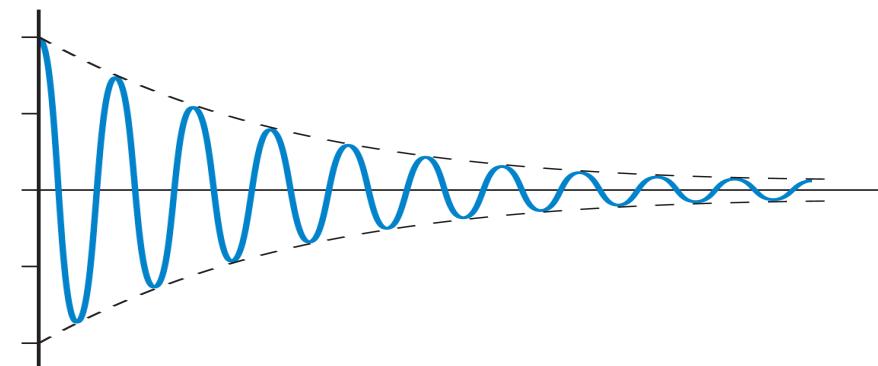
$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \mathbf{E}_0 e^{i(k(\omega)x - \omega t)}$$



$$E = E_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$$

$$k(\omega) = k_{\text{Re}}(\omega) + i k_{\text{Im}}(\omega)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \mathbf{E}_0 e^{i(k_{\text{Re}}(\omega)x - \omega t)} e^{-k_{\text{Im}}(\omega)x}$$



$$I(x) = I(0) e^{-\alpha x} \quad \text{Beer-Lambert law}$$

Absorption coefficient, material property

$$I(x) = |\mathbf{E}(x)|^2$$

$$\alpha(\omega) = 2k_{\text{Im}}(\omega)$$

תזכורת – פרמטרים אופטיים של חומרים

$$k(\omega) = k_{\text{Re}}(\omega) + i k_{\text{Im}}(\omega)$$

Wavevector

$$\Rightarrow n_{\text{index}}(\omega) = n_r(\omega) + i \kappa_r(\omega)$$

Refractive index

$$k(\omega)^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r(\omega)$$

$$\Rightarrow \epsilon_r(\omega) = \epsilon_{r,\text{Re}}(\omega) + i \epsilon_{r,\text{Im}}(\omega)$$

Permittivity

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

חוק אוּהם

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}$$

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e$$

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$$

$$\Rightarrow \chi_e(\omega) = \chi_{e,\text{Re}}(\omega) + i \chi_{e,\text{Im}}(\omega)$$

$$\Rightarrow \chi_e = \frac{i \sigma(\omega)}{\epsilon_0 \omega}$$

$$k_0 = \omega/c$$

$$k(\omega) = k_0 \sqrt{\epsilon_r(\omega)}$$

$$\Rightarrow \sigma(\omega) = \sigma_{,\text{Re}}(\omega) + i \sigma_{,\text{Im}}(\omega)$$

Conductivity

$$n_r(\omega) = \sqrt{\epsilon_r(\omega)}$$

סיכום – פרמטרים אופטיים של חומרים

$k(\omega) = k_{\text{Re}}(\omega) + ik_{\text{Im}}(\omega)$	Wavevector
$n_{\text{index}}(\omega) = n_r(\omega) + i\kappa_r(\omega)$	Refractive index
$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_{r,\text{Re}}(\omega) + i\epsilon_{r,\text{Im}}(\omega)$	Permittivity
$\chi_e(\omega) = \chi_{e,\text{Re}}(\omega) + i\chi_{e,\text{Im}}(\omega)$	Susceptibility
$\sigma(\omega) = \sigma_{,\text{Re}}(\omega) + i\sigma_{,\text{Im}}(\omega)$	Conductivity
$I(x) = I(0)e^{-\alpha x}$	Absorption coefficient

Material properties

$$\chi_e = \frac{i\sigma(\omega)}{\epsilon_0\omega}$$

$$n_r(\omega) = \sqrt{\epsilon_r(\omega)}$$

$$\epsilon_r = 1 + \chi_e$$

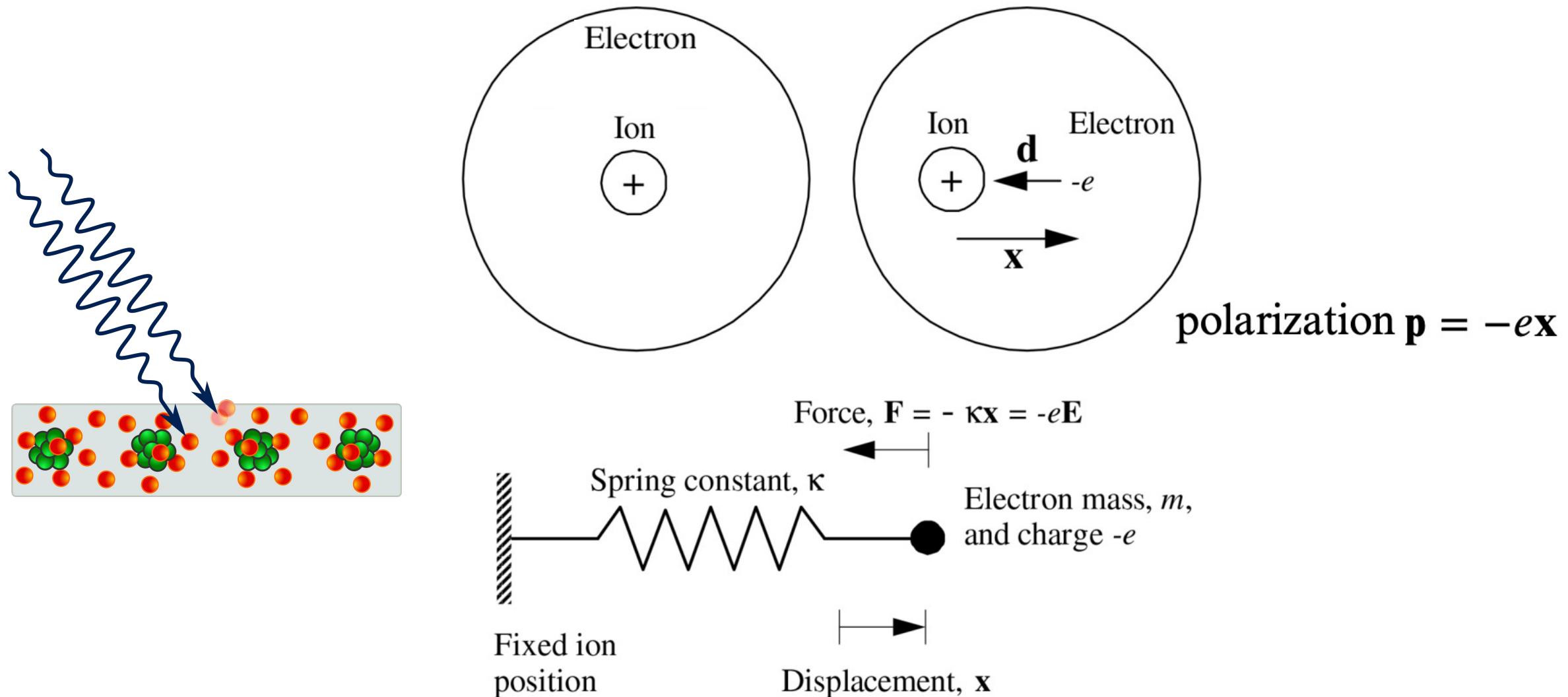
$$\alpha(\omega) = 2k_{\text{Im}}(\omega)$$

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{i\sigma(\omega)}{\epsilon_0\omega}$$

$$k(\omega) = k_0\sqrt{\epsilon_r(\omega)} = k_0 n_r(\omega)$$

$$k(\omega)^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r(\omega)$$

The Lorentz model – dielectric materials



The Lorentz model – equation of motion

$$m \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} + m\gamma \frac{d\mathbf{x}}{dt} + m\omega_0^2 \mathbf{x} = -e\mathbf{E}(t)$$

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e(\omega) \mathbf{E}(\omega)$$

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(\omega) e^{-i\omega t}$$

$$\frac{-e^2 n_0}{m} \frac{1}{(\omega^2 - \omega_0^2) + i\gamma\omega} \mathbf{E}(\omega) = \epsilon_0 \chi_e(\omega) \mathbf{E}(\omega)$$

$$m(-\omega^2 - i\gamma\omega + \omega_0^2) \mathbf{x}(\omega) = -e\mathbf{E}(\omega)$$

$$\mathbf{x}(\omega) = \frac{e\mathbf{E}(\omega)}{m(\omega^2 + i\gamma\omega - \omega_0^2)}$$

$$\boxed{\chi_e(\omega) = \frac{-\omega_p^2}{(\omega^2 - \omega_0^2) + i\gamma\omega}}$$

$$\mathbf{P} = -en_0\mathbf{x}(\omega) = \frac{-e^2 n_0}{m} \frac{1}{(\omega^2 - \omega_0^2) + i\gamma\omega} \mathbf{E}(\omega)$$

$$\omega_p = \sqrt{e^2 n_0 / \epsilon_0 m}$$

תדר הפלזמה

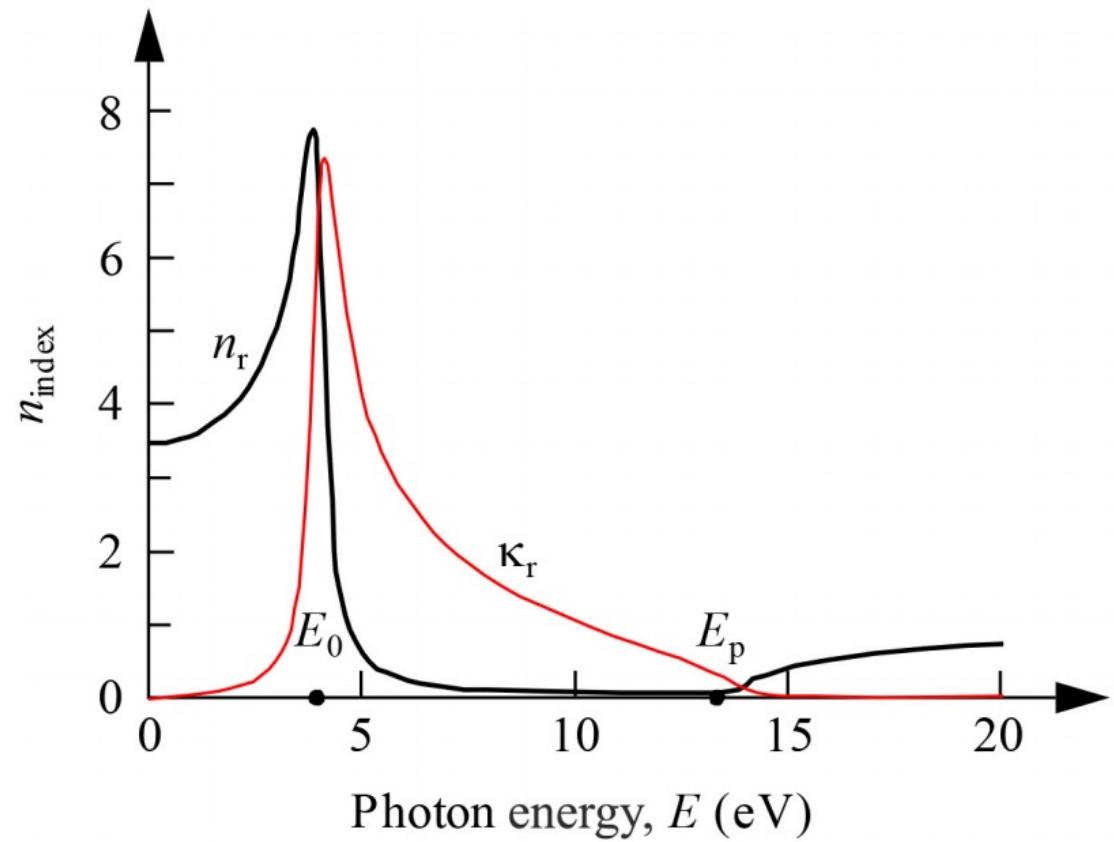
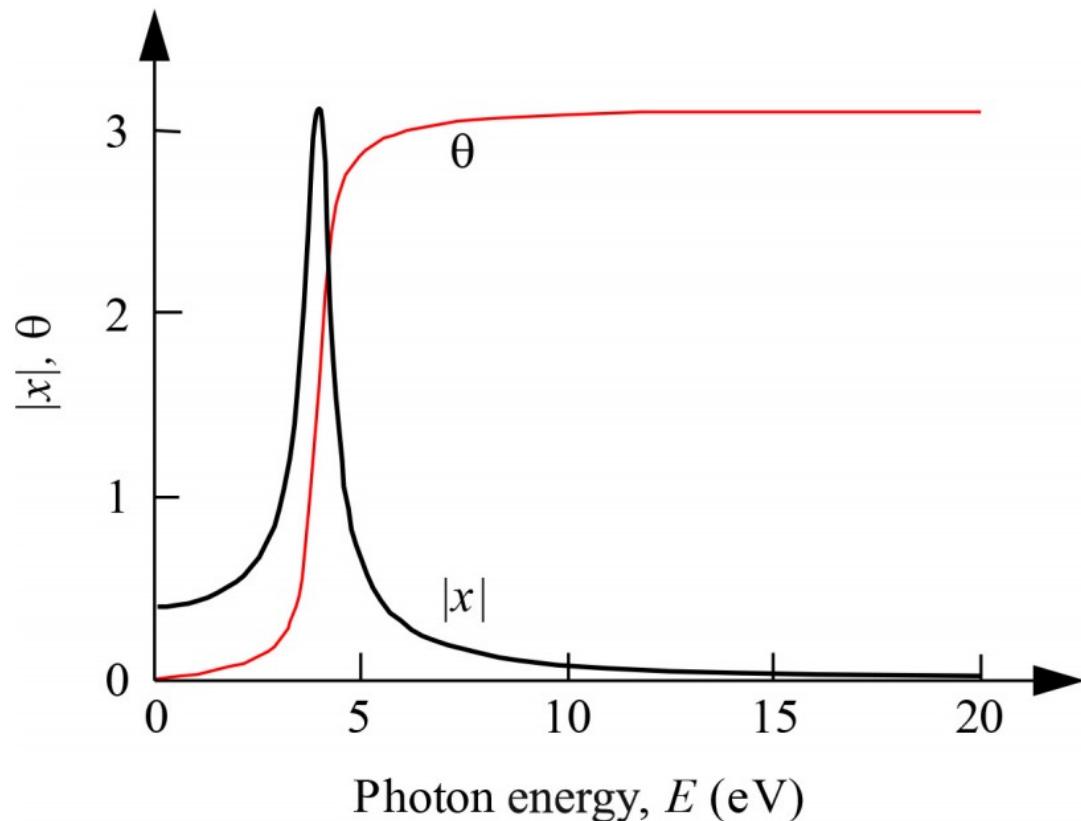
The Lorentz model - permittivity

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 + \chi_e(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 - \omega_0^2) + i\gamma\omega}$$

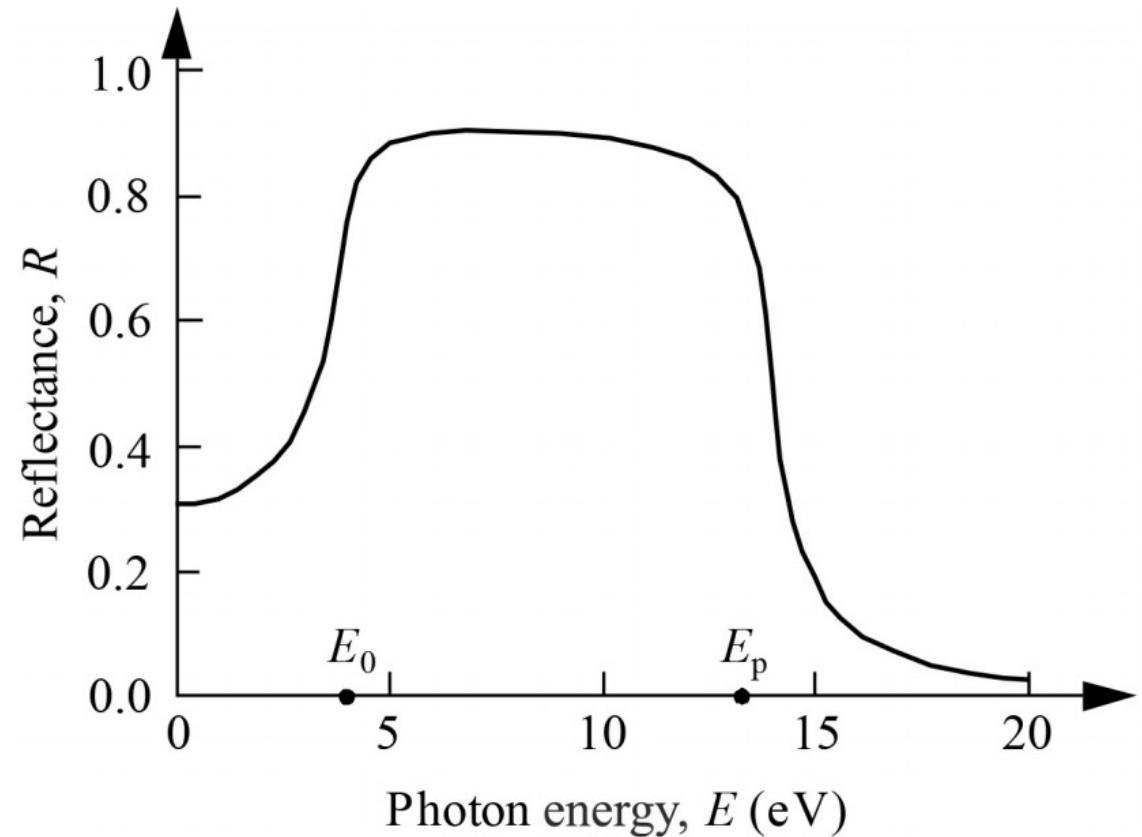
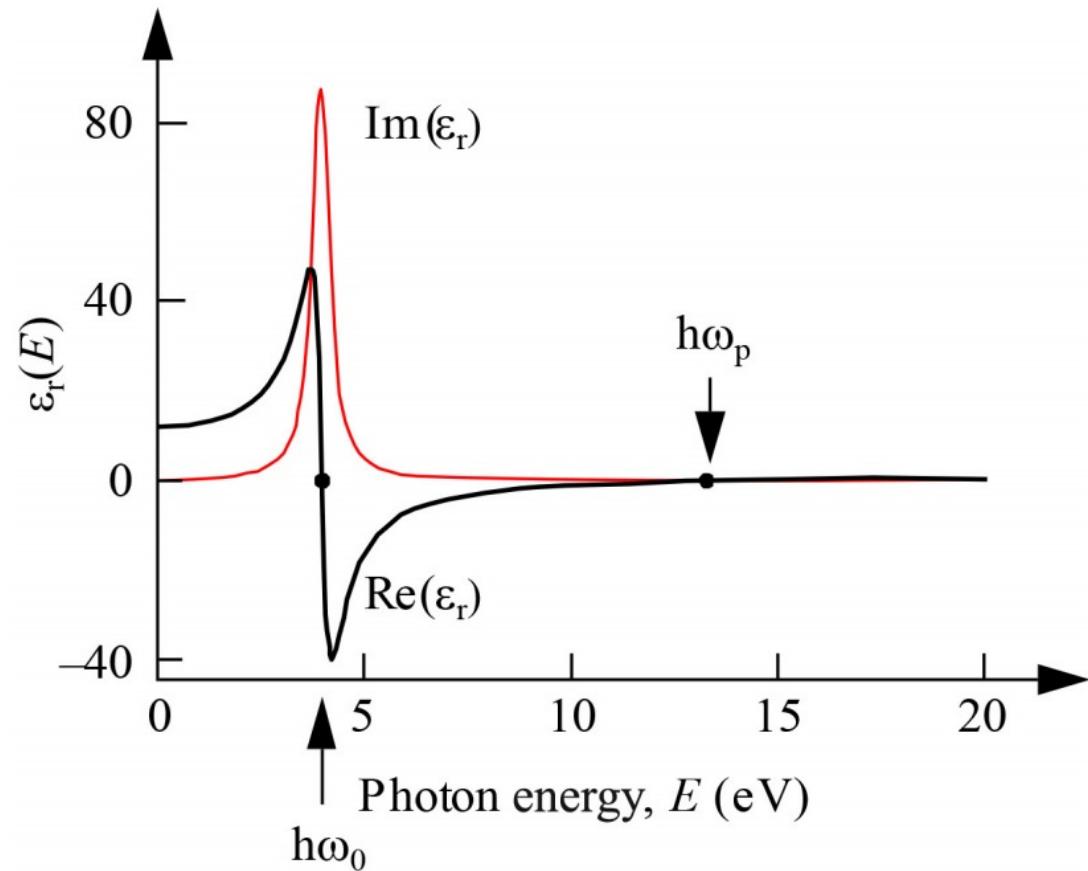
$$\varepsilon_{r,\text{Re}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2(\omega^2 - \omega_0^2)}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \gamma^2\omega^2}$$

$$\varepsilon_{r,\text{Im}}(\omega) = \frac{-\gamma\omega\omega_p^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \gamma^2\omega^2}$$

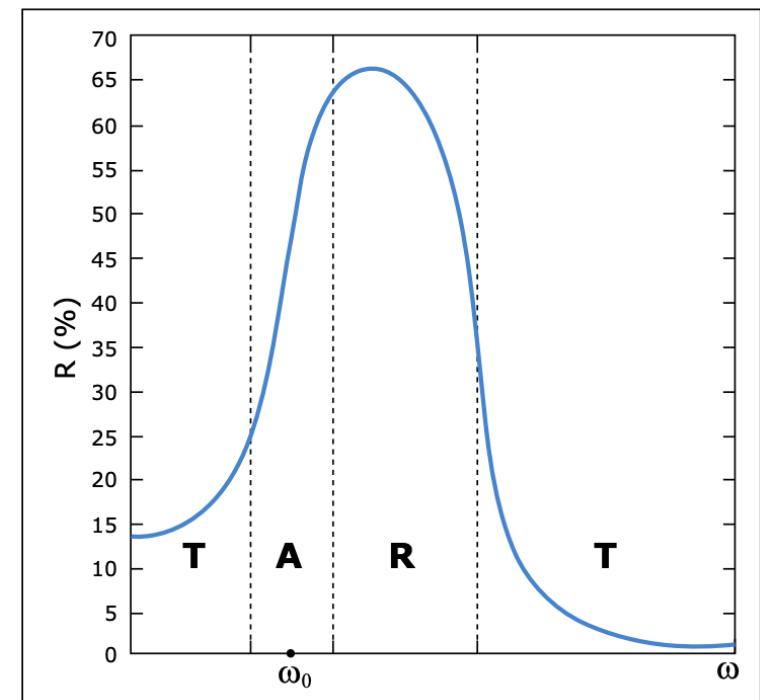
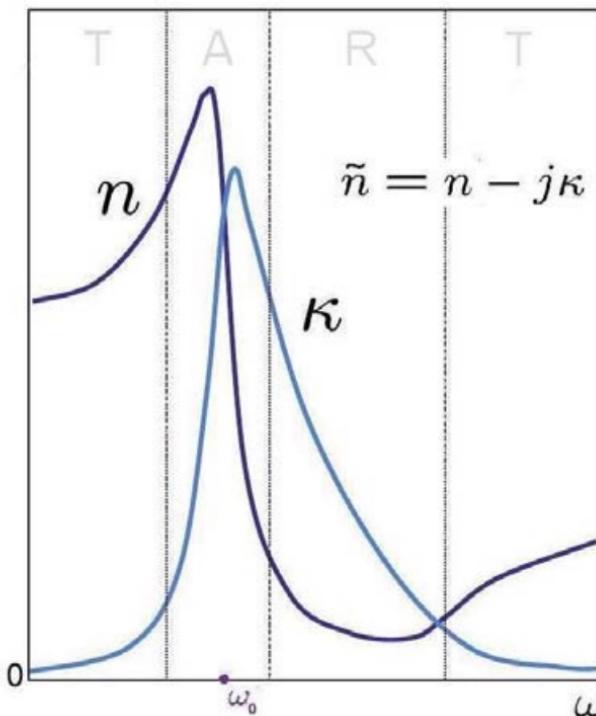
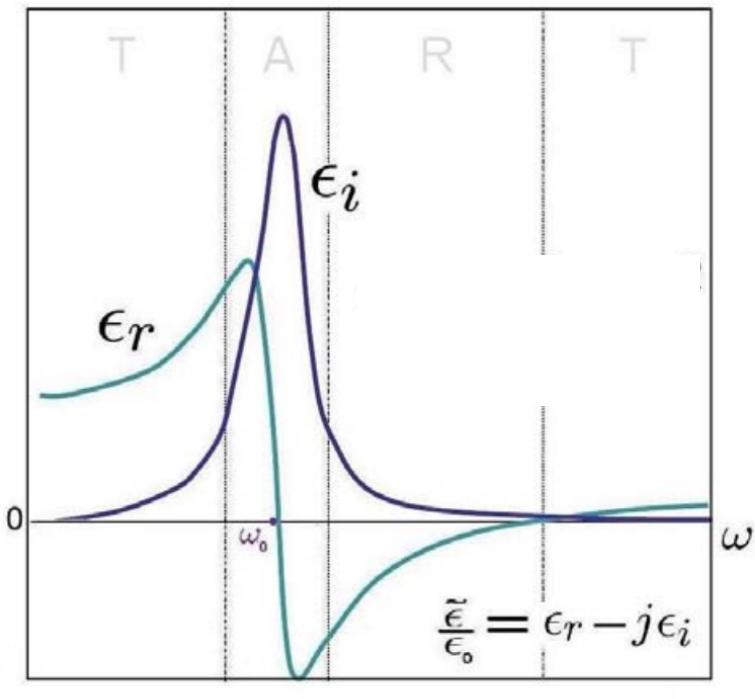
The Lorentz model



The Lorentz model



The Lorentz model



Metals - the Drude-Lorentz model

$$m \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} + m\gamma \frac{d\mathbf{x}}{dt} + mo\cancel{\chi_0^2}\mathbf{x} = -e\mathbf{E}(t)$$

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \chi_e(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 - \cancel{\omega_0^2}) + i\gamma\omega}$$

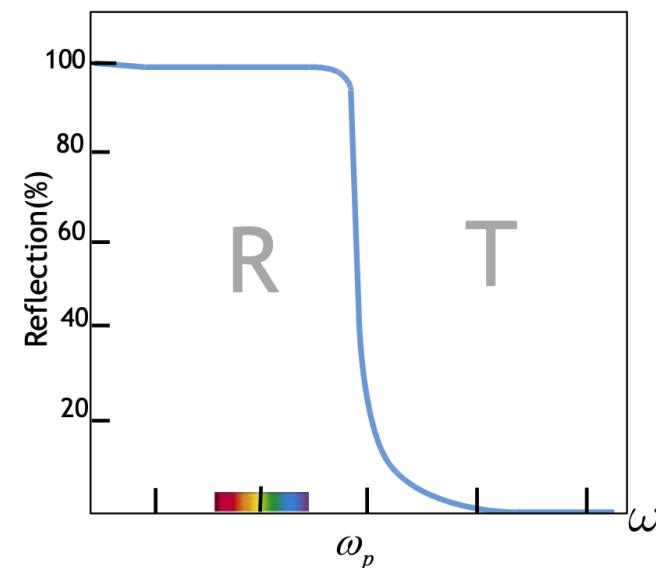
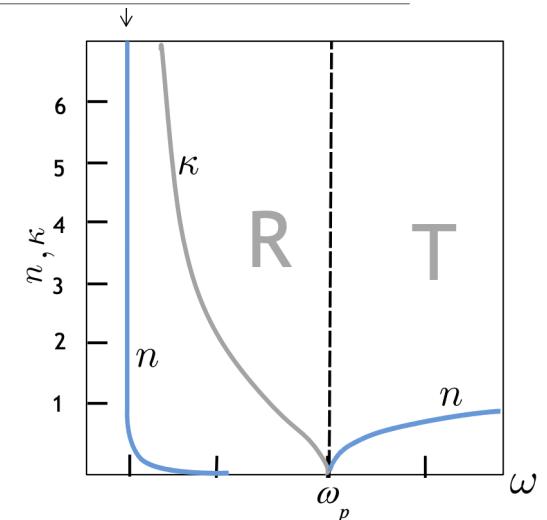
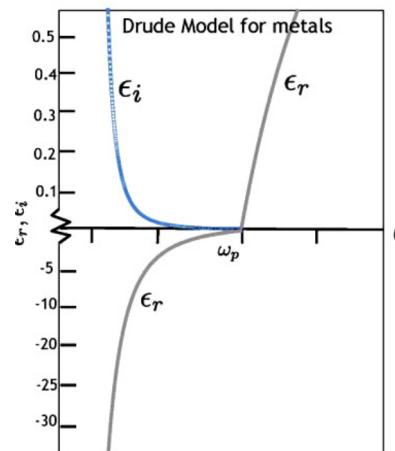
$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{i\sigma(\omega)}{\epsilon_0\omega}$$

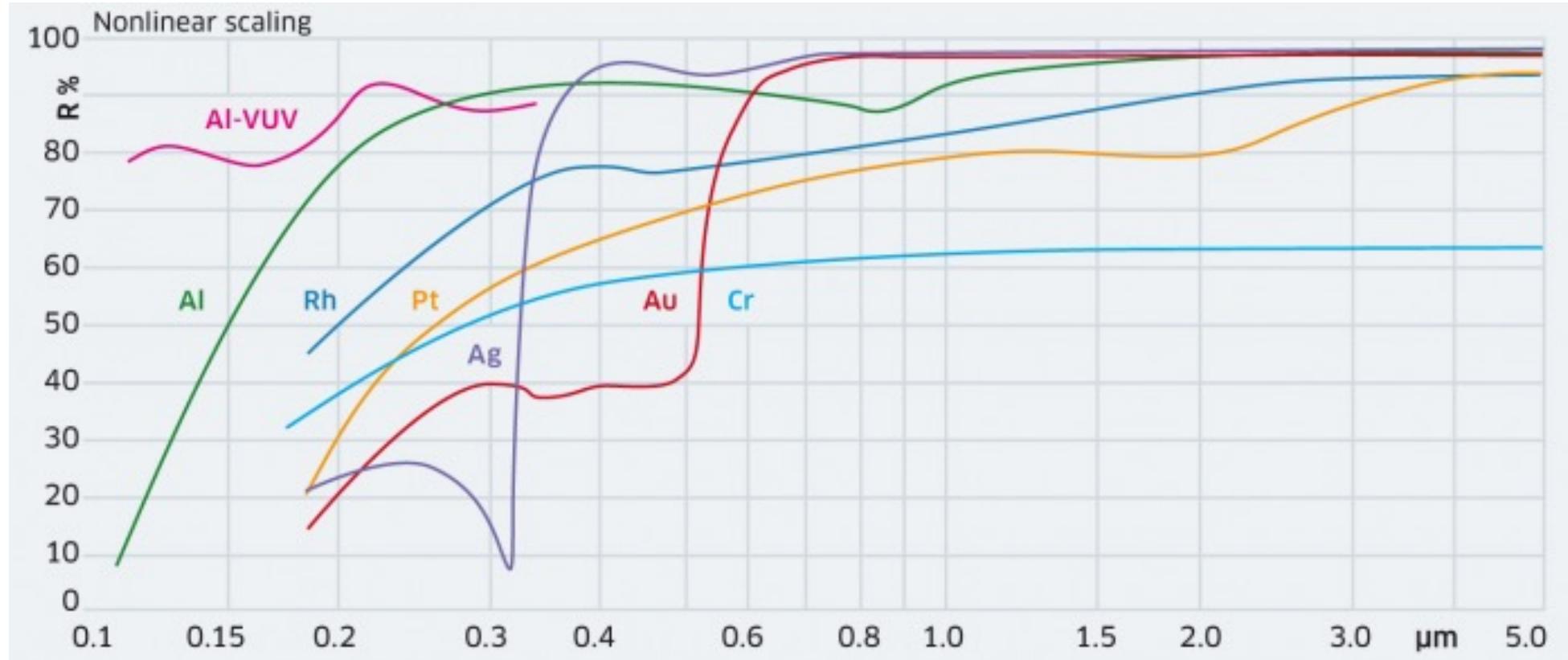
$$\gamma = 1/\tau \quad \sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m} = \omega_p^2\tau\epsilon_0$$

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 - i\omega\tau}$$

מודל Drude ל מוליכות של מתכות



Metals - the Drude-Lorentz model



The frequency-dependent complex permittivity

$$\tilde{\epsilon}_r(\omega) = \tilde{\epsilon}_r(\infty) + \omega_p^2 \sum_{m=1}^M \frac{f_m}{\omega_{0,m}^2 - \omega^2 - j\omega\Gamma_m}$$

This is used to account for the offset produced by resonances at frequencies higher than where you care about.

