

#9 Mikroskopska dielektrična susceptibilnost u vodičima i izolatorima

I Vodljivi elektroni i fononi

II Međuvrpčana pobuđenja

predavanja 20**

Kvazistatička elektromagnetska polja

Maxwellove jednadžbe u vodičima za $\omega \approx 0$

Skin efekt u polubeskonačnom vodiču

Skin efekt u cilindričnom vodiču

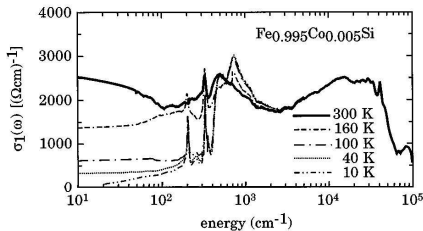
Anomalni skin efekt

Motivacija I i II

do koje mjere možemo koristiti izraz za susceptibilnost iz KED udžbenika za analizu elektrodinamičkih svojstava vodiča i izolatora?

- separacija elektronskih i fononskih doprinosa u odzivnim funkcijama: teškofermionski sustavi [Degiorgi, 1999]
- Jackson:

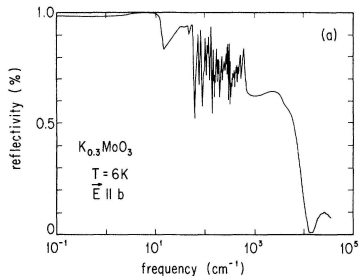
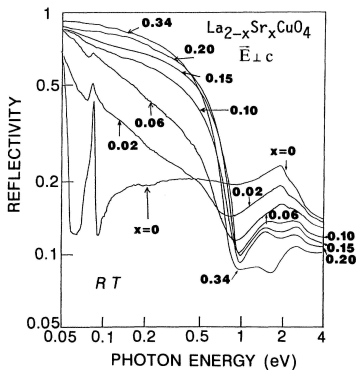
$$\chi^{\text{tot}}(\omega) = \frac{i\sigma^{\text{tot}}(\omega)}{\omega} = \frac{Ne^2}{m} \sum_i \frac{f_i}{\omega_i^2 - \omega^2 - i\gamma_i\omega}$$



Karakteristični eksperimentalni rezultati

mjerenje koeficijenta refleksije

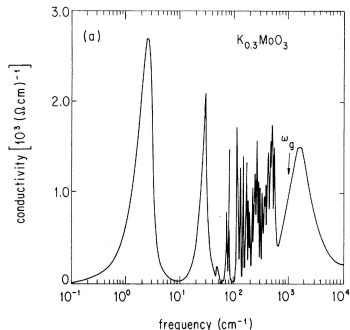
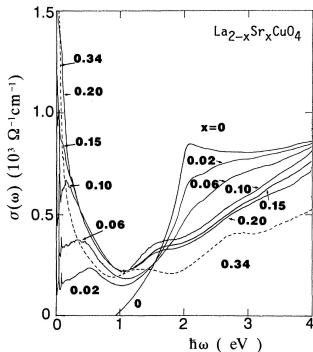
- u visokotemperaturnim supravodičima [Uchida *et al.*, 1991]
- u sustavima s valovima gustoće naboja [Degiorgi *et al.*, 1991]



Karakteristični eksperimentalni rezultati

transformacija podataka pomoću Kramers-Kronigovih relacija

- Drudeov (+ fononski) (+ ??) + međuvrščani doprinos
- kolektivni CDW + razni fononski + međuvrščani doprinosi
- procjena parametara u $f_i/[\omega_i^2 - \omega^2 - i\gamma_i\omega]$?



Drudeov i generalizirani Drudeov model

kako procijeniti parametre koji opisuju doprinos vodljivih elektrona?

- pomoću Drudeovog modela?

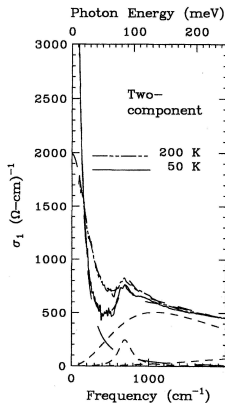
$$[4\pi e^2 n_{\alpha\alpha}^* / m = \Omega_{pl}^2]$$

$$\sigma_{\alpha\alpha}^{\text{intra}}(\omega) = \frac{e^2 n_{\alpha\alpha}^*}{m} \frac{i}{\omega + i\Gamma_{1\alpha}}$$

- pomoću generaliziranog Drudeovog modela

$$\sigma_{\alpha\alpha}^{\text{intra}}(\omega) = \frac{e^2 n_{\alpha\alpha}^*}{m} \frac{i}{\omega m_{\alpha\alpha}^*(\omega) / m + i\Gamma_{1\alpha}(\omega)}$$

- samosuglano određivanje strukture funkcija $\Gamma_{1\alpha}(\omega)$ i $m_{\alpha\alpha}^*(\omega)$ pomoću Kramers-Kronigovih relacija
- $\Omega_{pl} \approx 5700 \text{ cm}^{-1}$ i $\Gamma_1 \approx 250 \text{ cm}^{-1}$



Infracrveno-aktivni fononski modovi

na koji način efekti lokalnog električnog polja utječu na $\chi^f(\omega)$?

- enačbe gibanja

$$\mu(d/dt + \gamma)d\mathbf{p}/dt + \mu\omega_0^2\mathbf{p} = e^2\mathbf{E}_{\text{lok}}$$

$$\mu(d/dt + \gamma)d\mathbf{p}/dt + \mu\omega_{\text{TO}}^2\mathbf{p} = e^2\mathbf{E}$$

- fononska susceptibilnost (Clausius-Mossottijeva formula)

$$\chi^f(\omega) = \frac{(e^2/\mu V_{pc})}{\omega_{\text{TO}}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \approx \frac{\chi^{f,\text{lok}}(\omega)}{1 - (4\pi/3)\chi^{f,\text{lok}}(\omega)}$$

- nerenormalizirana fononska susceptibilnost

$$\chi^{f,\text{lok}}(\omega) = \frac{(e^2/\mu V_{pc})}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}$$

Infracrveno-aktivni fononski modovi

kako procijeniti parametre koji opisuju IC-aktivne fononske modove?

- proširenje modela na više fononskih grana $[\omega_{pi}^2 = (4\pi e^2 / \mu_i V_{pc})]$

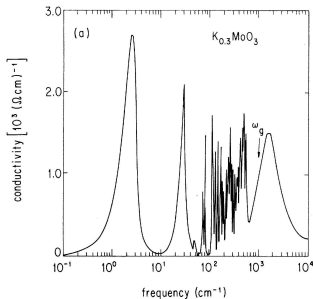
$$\chi^f(\omega) = \sum_i^{(f)} \frac{(e^2 / \mu_i V_{pc})}{[\omega_{TO}^{(i)}]^2 - \omega^2 - i\gamma_i \omega}$$

- na primjer (prvi fazonski mod):

$$\omega_{TO}^{(1)} = 3.3 \text{ cm}^{-1}$$

$$\omega_{p1} = 834 \text{ cm}^{-1}$$

$$\gamma_1 = 0.67 \text{ cm}^{-1}$$



Unutaratomske dipolni prijelazi

dipolno izborno pravilo za slobodne atome

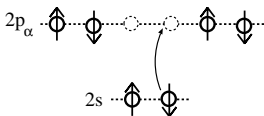
- izborno pravilo za dipolni prijelaz $X_{ll'}^\alpha = \langle n'l' | \hat{x}_\alpha | nl \rangle$

$$l - l' = \pm 1$$

- atomska polarizabilnost

$$\alpha_{sp}(\omega) = \frac{e^2 |X_{ps}^\alpha|^2}{\hbar\omega_{ps} + \hbar\omega + i\eta} + \frac{e^2 |X_{ps}^\alpha|^2}{\hbar\omega_{ps} - \hbar\omega - i\eta} \approx \frac{2e^2 \omega_{ps} |X_{ps}^\alpha|^2 / \hbar}{\omega_{ps}^2 - \omega^2 - i\omega\eta}$$

- $2s \rightarrow 2p_\alpha$ prijelazi na kisiku



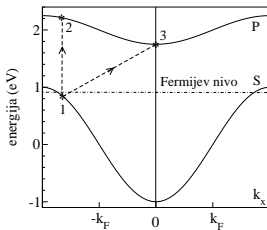
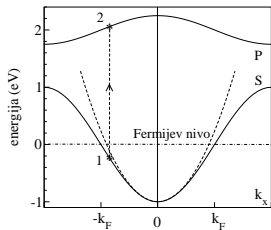
Jednoelektronska međuvrščana pobuđenja

direktni prijelazi u kristalnim sustavima

- (direktni) dipolni prijelazi u SP modelu [$\chi_{sp}^\alpha = \langle n' p_\alpha | \hat{x}_\alpha | ns \rangle$]

$$\chi_{\alpha\alpha}^{\text{inter}}(\omega) = \frac{1}{V} \sum_{LL'\mathbf{p}\sigma} \frac{|\chi_{sp}^\alpha|^2 [f_{L'}(\mathbf{p}) - f_L(\mathbf{p})]}{\hbar\omega + E_L(\mathbf{p}) - E_{L'}(\mathbf{p}) + i\hbar\Gamma_{2\alpha}}$$

- indirektni dipolni prijelazi (amorfni sustavi)



Kolektivna međuvrščana pobuđenja

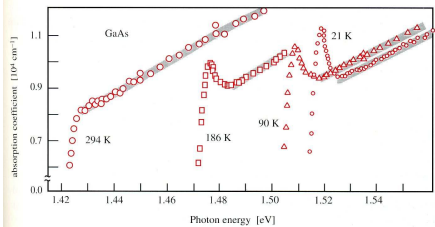
kako kratkodosežne dipol-dipol interakcije (Lorentzov doprinos) utječu na strukturu odzivnih funkcija?

- Frenkelovi i Wannierovi eksitoni
- dipol-dipol (**monopol-monopol i lokalne, Hubbardove**) interakcije

$$\tilde{\chi}_{\alpha\alpha}^{\text{inter}}(\omega) = \frac{\chi_{\alpha\alpha}^{\text{inter}}(\omega)}{1 - (4\pi/3)\chi_{\alpha\alpha}^{\text{inter}}(\omega)}$$

- razlika u odnosu na fononski slučaj

$$\sigma_1^{\text{inter}}(\omega) = \omega \tilde{\chi}_2^{\text{inter}}(\omega)$$



Transverzalno pravilo suma

- definicija parcijalne spektralne težine

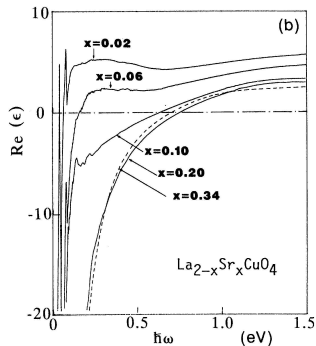
$$\Omega_{i,\alpha}^2 = 4 \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \operatorname{Re}\{\sigma_{\alpha\alpha}^i(\omega)\}$$

- transversalno pravilo suma

$$4 \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \operatorname{Re}\{\sigma_{\alpha\alpha}^{\text{tot}}(\omega)\} = \Omega_{\text{tot},\alpha}^2$$

$$\approx \frac{4\pi e^2 n}{m}$$

- procjena plazmotskih frekvencija?



Transverzavno pravilo suma

koje su najjednostavnije posljedice transverzalnog pravila suma

- primjer: metalni i poluvodički *SP* model
- ograničenje na vrijednost matičnog elementa preskoka

$$n_{\alpha\alpha}^* \leq n \rightarrow t_s \leq t_s^{\max}$$

- ograničenje na vrijednost dipolnog matičnog elementa

$$X_{sp} \leq X_{sp}^{\max}$$

