### Оптика наносистем



### Тимошенко Виктор Юрьевич

Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Физический факультет Научно-Образовательный Центр по нанотехнологиям

### Содержание курса

Лекция 1. Основные понятия оптики конденсированных фаз вещества.

Лекция 2. Взаимодействие света с металлами и диэлектриками.

Лекция 3. Поглощение света в полупроводниках.

Лекция 4. Экситонное и примесное поглощение света.

Лекция 5. Эмиссия излучения из твердых тел.

<u>Лекция 6. Оптические явления в неоднородных твердотельных системах.</u>

Лекция 7. Оптические свойства твердотельных нанокомпозитов.

Лекция 8. Фотонные кристаллы и микрорезонаторы.

Лекция 9. Рассеяние света в твердых телах.

Лекции 10,11. Влияние размеров тел на их оптические свойства.

**Лекции 12-14.** Экситоны в полупроводниковых наноструктурах.

<u>Лекция 15. Оптические свойства и применения полупроводниковых</u> наноструктур.

Лекция 16. Элементы спиновой оптики и спинтроники.

**Лекция 17.** Нелинейные оптические явления в твердотельных системах.

Лекция 18. Элементы нелинейной оптики наноструктур и нанокомпозитов.

# **Лекция 7.** Оптические свойства

твердотельных нанокомпозитов

Показатель преломления статистической гетеросистемы на основе полупроводниковых наноструктур. Фактор деполяризации и оптическая анизотропия формы в гетеросистемах. Двулучепреломление формы и анизотропия поглощения (дихроизм). Частотная зависимость Друде-поглощения в нанокомпозитах. Распространение света в периодических средах. Оптическая анизотропия периодических сред.

# Оптические свойства нанокомпозитов в электростатическом приблежении



Если характерные размеры структурных элементов *d* каждой из фаз много меньше длины световой волны λ, то гетеросистема может быть рассмотрена как однородная оптическая среда, а ее свойства могут быть описаны эффективной диэлектрической проницаемостью  $\mathcal{E}_{eff}$  и эффективным показателем преломления  $n_{eff}$ 

 $\varepsilon_{eff} \equiv \frac{\langle \vec{D} \rangle}{\langle \vec{E} \rangle}$  $n_{eff} = \sqrt{\varepsilon_{eff}}$ 

(система единиц СГС)

Это может быть легко сделано в электростатическом приближении:

 $d \ll \lambda$ 

### Эффективная диэлектрическая проницаемость многокомпонентной статистической гетеросистемы

Факторы заполнения для фаз:

 $\frac{1}{3} \le f_j \le \frac{2}{3}$ 

Последняя формула может быть обобщена на случай эллипсоидальной формы включений, что дает, так называемую, обобщенную формулу Бруггемана:

$$\sum_{j=1}^{N} f_j \frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_j}{\varepsilon_{eff} + L_j(\varepsilon_j - \varepsilon_{eff})} = 0$$

Фактор деполяризации *L<sub>j</sub>* определяет локальное электрическое поле в области *j* – *й* фазы:

$$\vec{E}_{j} = \vec{E} - 4\pi \hat{L}_{j}\vec{P}$$

$$L_x + L_y + L_z = 1$$

для цилиндра:  $L_{\parallel} = 0$   $L_{\perp} = \frac{1}{2}$   $L_{\parallel} + 2L_{\perp} = 1$ 

для сферы:  $L_x = L_y = L_z = \frac{1}{3}$ 

### Анизотропия формы (form anisotropy)

uniaxial negative crystals





Рассматриваемая система ведет себя как отрицательный одноосный кристалл

### Анизотропия поглощения света (дихроизм) в статистической гетеросистеме со свободными носителями заряда

Im  $\varepsilon_1 = 0$   $\varepsilon_2 = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega\tau^{-1}}$ Пусть:  $\begin{aligned} \varepsilon_{\parallel} &= f_1 \varepsilon_1 + f_2 \varepsilon_2 = f_1 \varepsilon_1 + f_2 \varepsilon_{\infty} - \frac{f_2 \omega_p^2}{\omega_2^2 - i\omega \tau^{-1}} \\ \varepsilon_{\perp} &= \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{f_1 \varepsilon_2 + f_2 \varepsilon_1} = \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega \tau^{-1}}}{f_2 \varepsilon_1 + f_1 \varepsilon_{\infty} - \frac{f_1 \omega_p^2}{\omega^2 - i\omega \tau^{-1}}} \end{aligned}$ Тогда :  $d_2$  $\alpha_{\parallel} = \frac{\omega \operatorname{Im}(\varepsilon_{\parallel})}{cn_{\parallel}} \propto \frac{\omega_{p}^{2}}{cn_{\parallel}\tau\omega^{2}} \propto \omega^{-2} \qquad \omega >> \tau^{-1}$ 100 10  $\alpha_{\perp} = \frac{\omega \operatorname{Im}(\varepsilon_{\perp})}{cn_{\perp}} \approx \varepsilon_{1} \omega^{2} \tau \frac{\omega_{p}^{\prime 2} \varepsilon_{\infty} - \omega_{p}^{2} \varepsilon_{\infty}^{\prime}}{cn_{\perp}} \propto \omega^{2} \qquad \omega << \tau^{-1}$ 0.1 0.001 В ламинарной ГС может возникать как 0.01 0.1 1 10 100 двулучепреломление, так и дихроизм :  $\alpha_{\parallel} \neq \alpha_{\perp}$ 

### Получение пористого кремния методом электрохимического травления



- •Огромная удельная поверхность (до 800 m<sup>2</sup>/g)
- •Возможность формирования наноструктур с размерами 1-50 нм

•Интенсивная фотолюминесценция (квантово-размерный эффект) •Простота изготовления

## Управление величиной показателя преломления изотропного пористого кремния



Приближение эффективной среды (модель Бругемана)

*є <sup>eff</sup>* для неупорядоченной гетерогенной смеси:

$$P\frac{\mathcal{E}_{d}-\mathcal{E}^{eff}}{\mathcal{E}_{d}+2\mathcal{E}^{eff}}+(1-P) \frac{\mathcal{E}_{Si}-\mathcal{E}^{eff}}{\mathcal{E}_{Si}+2\mathcal{E}^{eff}}=0$$



Показатель преломления:

$$n = \sqrt{\boldsymbol{\mathcal{E}}^{eff}}$$

## Оптическая анизотропия пленок пористого кремния с ориентацией поверхности (100) и (110)



Positive crystal  $(n_e > n_o)$ 

Negative crystal  $(n_o > n_e)$ 

# Электронная микроскопия (110) слоев пористого кремния



Поры (светлые области) и кремниевые нанокристаллы показывают преимущественную ориентацию в плоскости слоя в направлениях [001] и [1 10]

## Спектры пропускания и отражения пленок (110)пористого кремния в неполяризованном свете



### Фурье-анализ ИК спектров пропускания слоев пористого кремния при различных углах падения



Пористый кремний с ориентацией поверхности (110) является отрицательным двулучепреломляющим кристаллом ( $n_o > n_e$ ).

### Влияние плотности тока анодирования на двулучепреломление пористого кремния



For layers prepared  
at j =100 mA/cm<sup>2</sup>:  
$$\Delta n=0.24$$
  
 $\langle n \rangle = (n_o+n_e)/2 = 1.3$   
 $\delta n=\Delta n/\langle n \rangle = 0.18$   
at  $\lambda=1-10 \ \mu m$ 

medium	$\Delta n$
Crystalline Si	$5.10^{-6}$
Iceland Spar(CaCO <sub>3</sub> )	0.15
<b>Por-Si</b> (110)	0.24

Наноструктурированные слои пористого кремния обладают сильной анизотропией, большей, чем, например, в исландском шпате, и в более широком спектральном диапазоне

#### Дисперсия показателя преломления



#### Generalized Bruggeman model (EMA):

$$P\frac{\varepsilon_{M}-\varepsilon_{ef}^{o,e}}{\varepsilon_{ef}^{o,e}+L_{o,e}(\varepsilon_{M}-\varepsilon_{ef}^{o,e})}+(1-P)\frac{\varepsilon_{Si}-\varepsilon_{ef}^{o,e}}{\varepsilon_{ef}^{o,e}+L_{o,e}(\varepsilon_{Si}-\varepsilon_{ef}^{o,e})}=0$$

Salzberg equation :

$$n_{o,e}^{2} = A_{o,e} + K_{o,e} / (\lambda^{2} - B_{o,e}) + C_{o,e} \lambda^{2}$$

#### Взаимодействие света со свободными

носителями заряда в кремнии



 $\alpha \sim N_{FC} \omega^{-2} \sim N_{FC} \lambda^2$ 

### Спектры поглощения света на свободных носителях заряда в пористом и кристаллическом кремнии



V. Timoshenko et al. PRB (2001)

# Спектры пропускания слоев мезопористого кремния



# Спектры отражения слоев кристаллического и пористого кремния



For c-Si :





•R( $\omega$ ) allows to get  $\alpha(\omega)$ =-ln{T( $\omega$ )/[1-R( $\omega$ )]}/thickness

#### Модельное описание взаимодействия света с носителями заряда в изотропном пористом кремнии

D.A.G. Bruggeman (1935) :

P. K. L. Drude (1900) :

Multiply beam reflection (h - layer thickness)

## Расчет коэффициента поглощения в нанокристаллах кремния



• Frequency dependent damping is necessary to describe  $\alpha$  at low frequencies

### Сравнение теории и эксперимента



Current	Porosity	Refraction	Free hole concentration, $N_{\rho}$ (cm <sup>-3</sup> )	
j	<b>p</b> (%)	index,	as-prepared	aged in air
(mA/см²)		n		
25	62	1.76	1.1·10 <sup>19</sup>	1.4·10 <sup>18</sup>
50	68	1.60	1.3·10 <sup>19</sup>	1.02·10 <sup>18</sup>
75	71	1.52	1.5·10 <sup>19</sup>	1.23·10 <sup>18</sup>



### Анизотропные пористые слои



### Обобщенная модель Бруггемана

$$(1-P) \cdot \frac{\varepsilon_{Si} - \varepsilon_{i}}{\varepsilon_{i} + L_{i} \cdot [\varepsilon_{Si} - \varepsilon_{i}]} + P \cdot \frac{\varepsilon_{Pores} - \varepsilon_{i}}{\varepsilon_{i} + L_{i} \cdot [\varepsilon_{Pores} - \varepsilon_{i}]} = 0$$

 $\varepsilon_i$  : effective dielectric function

 $L_i$ : depolarization - factor different for

main axes of elipsoid (i = [001], [110] in - plane directions) [001]  $\varepsilon_{Pores}$ : dielectric function of substance in the pores  $\varepsilon_{Si}$ : dielectric function of bulk Si P: porosity  $n_i = \operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon_i})$   $\alpha_i = \frac{2\omega \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon_i})}{c}$ 

#### Дихроизм в слоях анизотропного пористого кремния



Absorption anisotropy is consistent with the birefringence and both are described by a model of the form anisotropy of Si nanocrystals constituting (110) meso-PS

V. Timoshenko et al. PRB (2003)

### <u>Контрольные вопросы к</u> <u>Лекции 7:</u>

- Что такое двулучепреломление формы?
- Что такое дихроизм?
- Как направлена оптическая ось ламинарной системы?
- Как изменяется дисперсия показателя преломления в ламинарной системе при наличии взаимодействия света со свободными носителями заряда?
- Какие примеры наноструктур с анизотропий оптических свойств вы знаете?