

Дисперсия показателей преломления

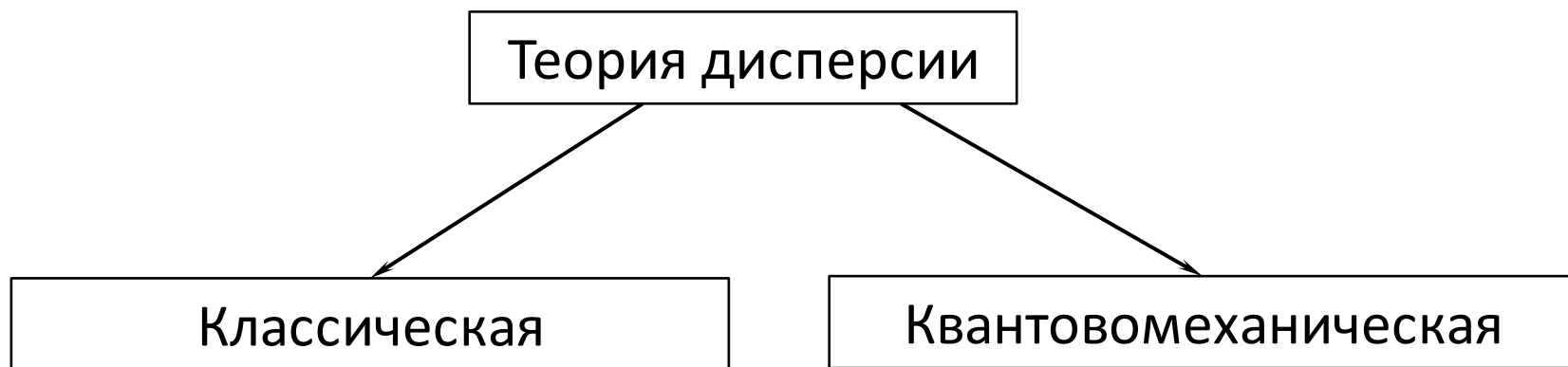
Мефистофель

Во всем подслушать жизнь стремясь,
Спешат явления обездушить,
Забыв, что если в них нарушить
Одушевляющую связь,
То больше нечего и слушать.
И. Гете, Фауст

Теории дисперсии

[Огюстен Коши](#) предложил эмпирическую формулу для аппроксимации зависимости показателя преломления среды от длины волны:

$$n=A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$$



Классическая теория дисперсии

М.Борн, Э. Вольф.

ОСНОВЫ ОПТИКИ

М., Наука 1973

С.И. Борисенко, О.Г. Ревинская, Н.С. Кравченко, А.В. Чернов

**ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА И МЕТОДЫ ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие

Издательство

Томского политехнического университета

2014

А.М. Ефимов

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И МЕХАНИЗМЫ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

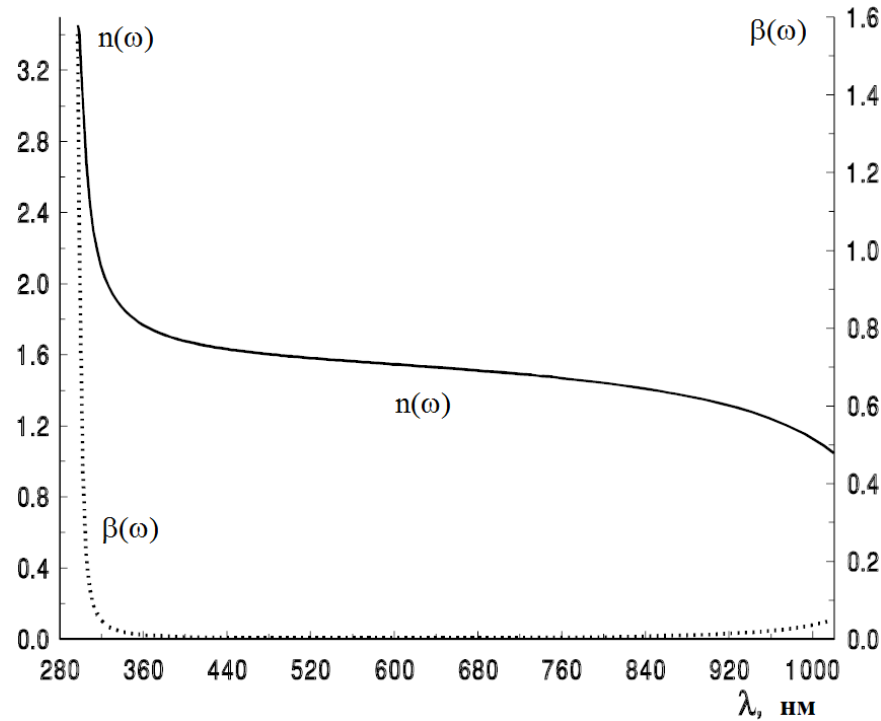
Учебное пособие

ИТМО Государственный университет

Санкт-Петербург

2008

Уравнение Селмейера (Зелльмейера - Sellmeier)

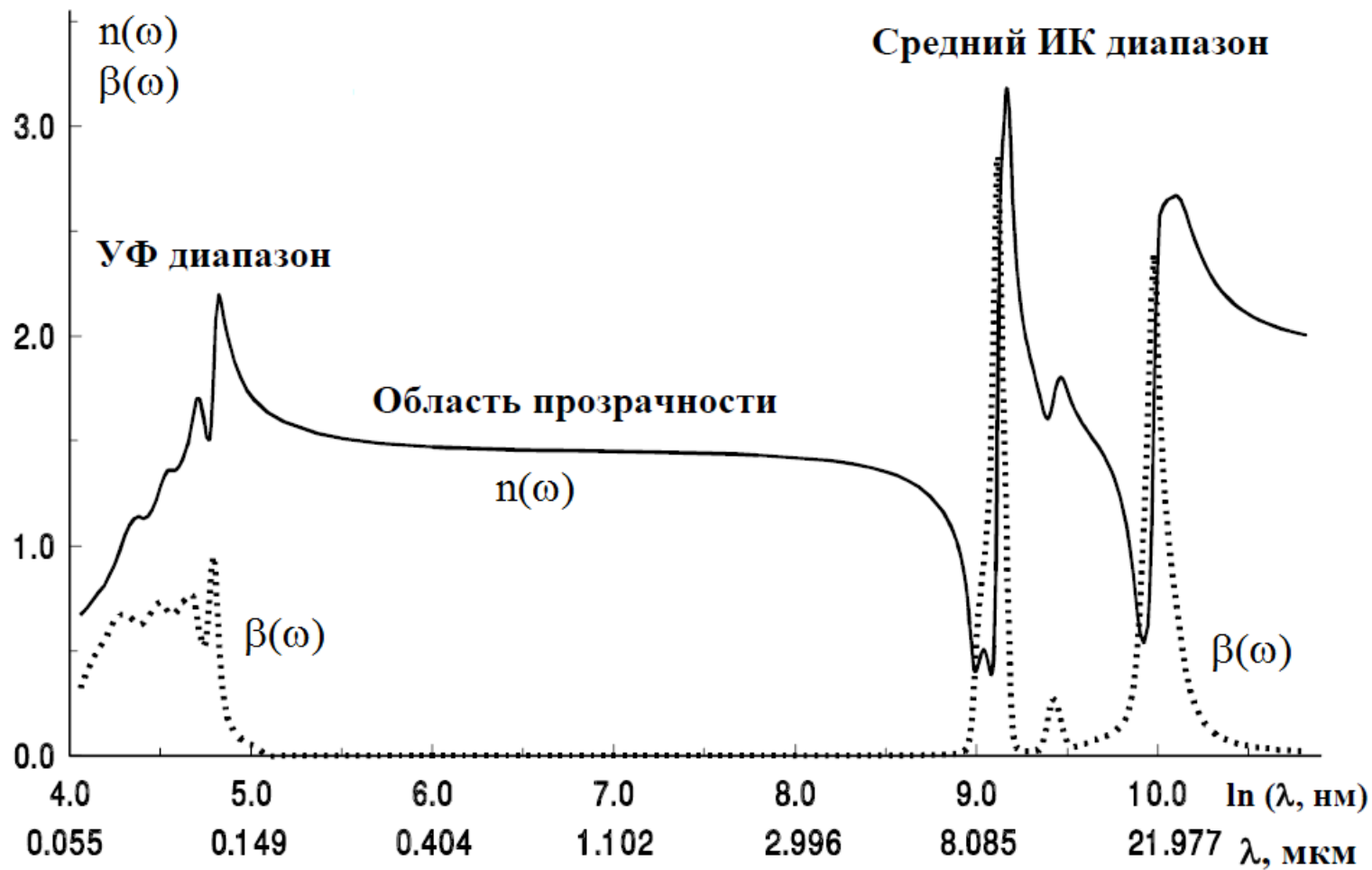


$$\varepsilon - 1 = n^2(\lambda) - 1 = \frac{A\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad \varepsilon - 1 = n^2(\lambda) - 1 = \sum_{m=0}^M \frac{A_m \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_m^2}$$

Ограничения:

- невзаимодействующие частицы одного сорта,
- не учитывает связь между преломлением и поглощением,
- пригодна только в области, где $\lambda > \lambda_m$.

Преломление и поглощение среды



Стеклообразный кремнезем

Аналитическая модель Друде

Вещество состоит из заряженных частиц, которые могут совершать собственные колебания с частотой ω_0 - **заряженные осцилляторы**.

Аналог - колебания механического гармонического осциллятора.

В качестве исходного используется дифференциальное уравнение Ньютона для вынужденных затухающих колебаний осциллятора.

За вынуждающую силу принимается сила, создаваемая электрической составляющей электромагнитного поля световой волны, а роль коэффициента трения играет коэффициент затухания электронного осциллятора.

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F_{\text{вн}} + F_{\text{упр}} + F_{\text{тр}} = qE - m\omega_0^2 r - 2mb \frac{dr}{dt}$$

где: r – радиус-вектор отклонения частиц от положения равновесия;
 $E = E_0 e^{-j\omega t}$ – световой вектор в точке, где находится частица;
 m и q – значения массы и заряда частиц;
 b – коэффициент затухания собственных колебаний частицы.

Аналитическая модель Друде

Решение - уравнение вынужденных гармонических колебаний

$$\bar{r} = \bar{r}_0 e^{-i\omega t}$$

где

$$\bar{r}_0 = \frac{q\bar{E}_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i2b\omega)} = \frac{q\bar{E}_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4b^2\omega^2}} e^{i\varphi}$$

\bar{E}_0 – амплитуда вынужденных колебаний;

φ – разность фаз между вынужденными колебаниями частиц и колебаниями светового вектора

$$\varphi = \arctg\left(\frac{2b}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)$$

Из электродинамики вынужденные колебания заряженных частиц приводят к поляризации вещества, которая для невзаимодействующих частиц одного сорта описывается вектором поляризации, равным \bar{P}

$$\bar{P} = N\bar{p},$$

где N – концентрация частиц;

$\bar{p} = q\bar{r}$, – дипольный момент частицы.

Аналитическая модель Друде

Связь вектора поляризации с вектором электрического смещения

$$\bar{D} = \tilde{\epsilon}\epsilon_0\bar{E} = \epsilon_0\bar{E} + \epsilon_0\bar{P}$$

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon + i\epsilon' = 1 + \frac{q^2 N}{m\epsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2 - i2b\omega)}$$

$$\epsilon(\omega) = \frac{q^2 N}{m\epsilon_0[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4b^2\omega^2]}$$

$$\epsilon'(\omega) = \frac{2q^2 Nb}{\omega m\epsilon_0[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4b^2\omega^2]}$$

Связь модели Друде с формулой Селмейера

$b = 0 \rightarrow \epsilon'(\omega) = 0$ – в диапазоне прозрачности, $\epsilon(\omega) = n^2$

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{A\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$$

$$n^2(\lambda) - 1 = \sum_{j=0}^J \frac{A_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2}$$

Аналитическая модель Лоренц-Лорентца

Напряженность внешнего поля E и напряженность внутреннего поля в материале E_{int} могут не совпадать. В этом случае $E_{int} = E + E_{loc}$, где E_{loc} - собственное локальное поле в материале, величина которого должна зависеть от особенностей состава и структуры материала.

$$\frac{\varepsilon(\omega) - 1}{\varepsilon(\omega) + 2} = \frac{1}{3} \frac{q^2 N}{m \varepsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2 - i 2 b \omega)}$$

Поправка Лоренц – Лорентца.

Для группы частиц

$$\frac{\varepsilon(\omega) - 1}{\varepsilon(\omega) + 2} = \frac{1}{3} \sum_{j=0}^J \frac{q_j^2 N}{m_j \varepsilon_0 (\omega_j^2 - \omega^2 - 2 b_j \omega)}$$

Уравнения Селмейера

$$n_i^2 = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + D\lambda^2$$

$$n_i^2 = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + D\lambda^2 + E\lambda^4$$

$$n_i^2 = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}$$

$$n_i^2 = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}$$

$$n_i^2 = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E} + F\lambda^4$$

$$n_i^2 = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} + \frac{D}{\lambda^2 - E}$$

$$n_i^2 = A + \frac{B}{\lambda^2 - C}$$

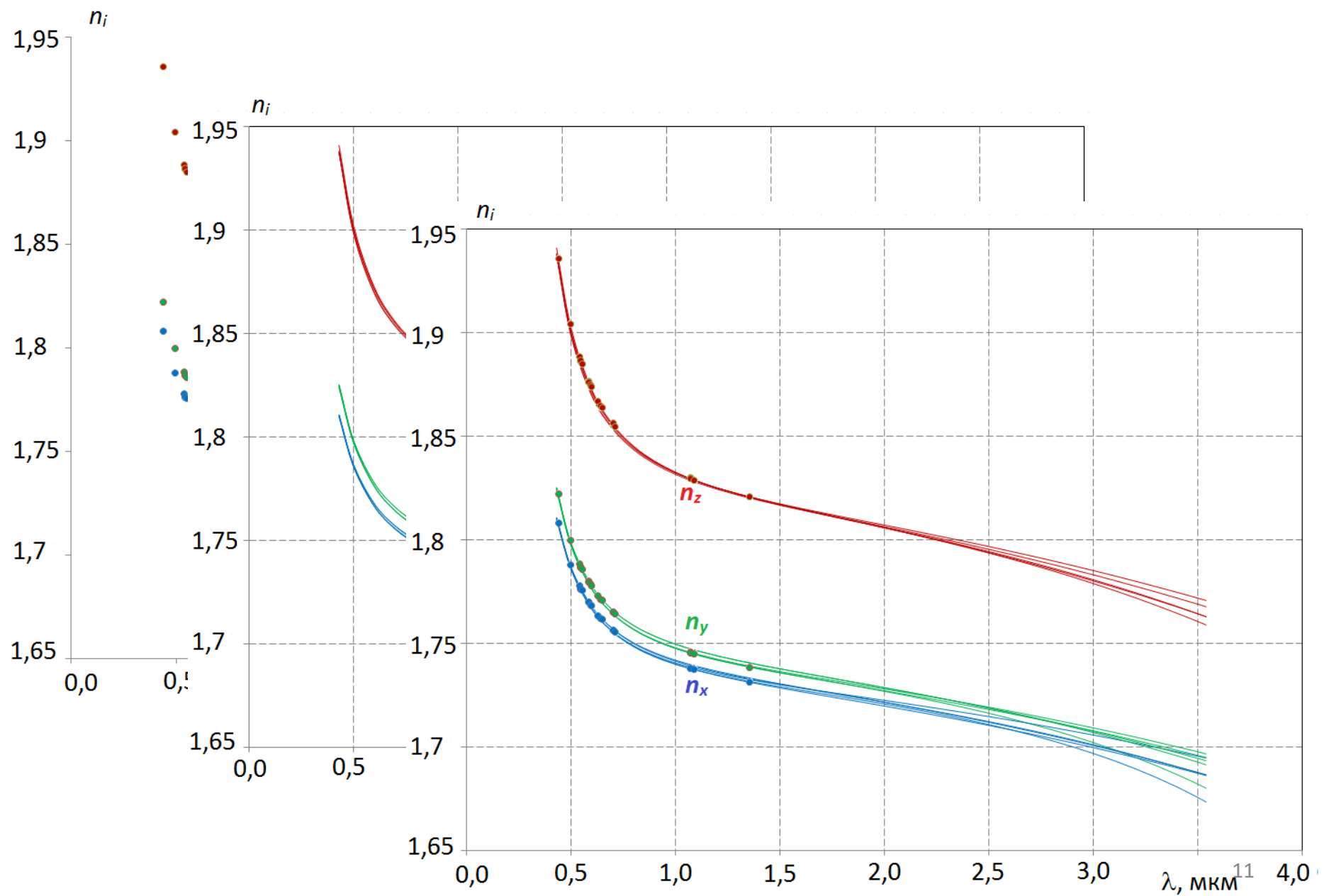
$$n_i^2 = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} + D\lambda^2$$

$$n_i^2 = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} + D\lambda^2 + E\lambda^4 + F\lambda^6$$

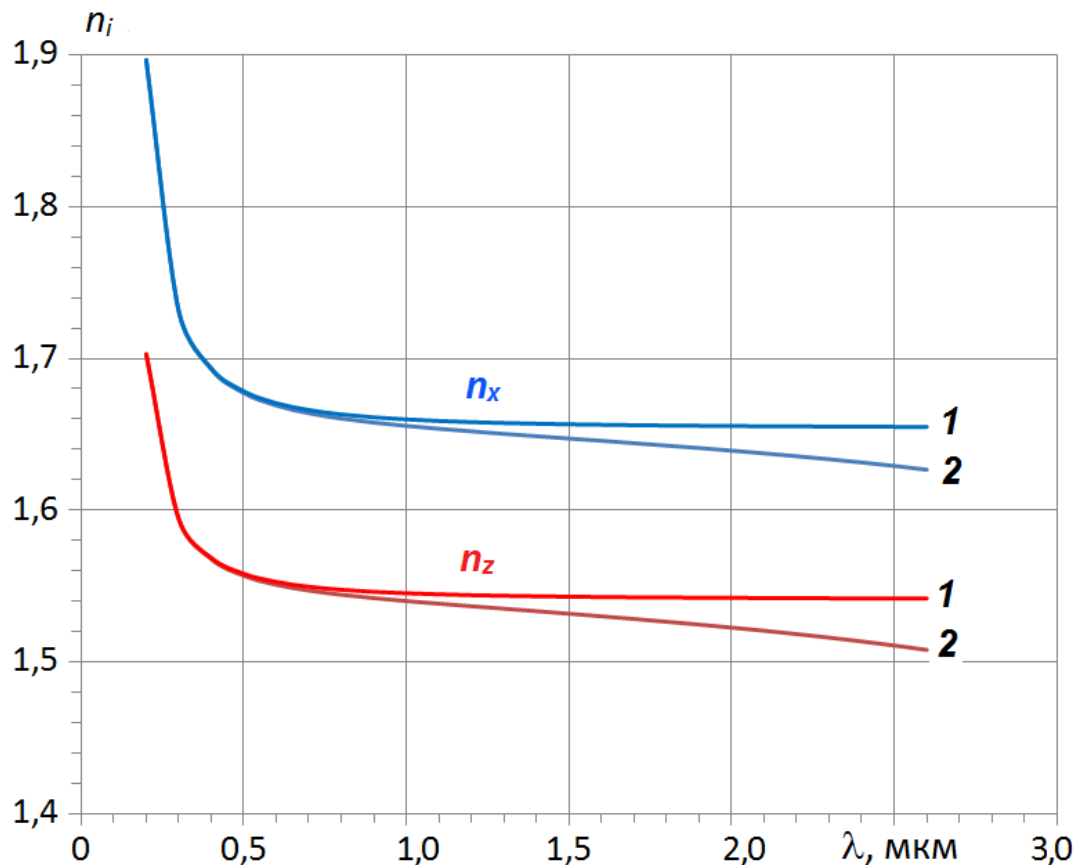
$$n_i^2 = A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D}{\lambda^2} + \frac{E}{\lambda^4} + \frac{F}{\lambda^6} \quad - \text{BBO ТГЦ}$$

$$n_i^2 = (A + BT) + \frac{(C + DT)\lambda^2}{\lambda^2 - (E + FT)} + \frac{(K + MT)\lambda^2}{\lambda^2 - P} \quad T - \text{температура}$$

Кристалл КТР



Кристалл ВВО



$$n_x^2 = 2.7359 + \frac{0.01878}{\lambda^2 - 0.01822} - 0.01354\lambda^2$$

$$n_z^2 = 2.3753 + \frac{0.01224}{\lambda^2 - 0.01667} - 0.01516\lambda^2$$

$$n_x^2 = 2.7359 + \frac{0.01878}{\lambda^2 - 0.01822} - 0.01471\lambda^2 + 0.608110^{-3}\lambda^4 - 67.410^{-6}\lambda^4$$

$$n_z^2 = 2.3753 + \frac{0.01224}{\lambda^2 - 0.01667} - 0.01627\lambda^2 + 0.571610^{-3}\lambda^4 - 63.0510^{-6}\lambda^4$$

- [1] K. Kato. Second-harmonic generation to 2048A in β -BaB₂O₄. IEEE J. Quant. Electr. , 1986, v.22, N7, p.1013–1014.
- [2] D. Zhang, Y. Kong, J. Zhang. Optical parametric properties of 532-nm-pumped betabarium-borate near the infrared absorption edge. Opt. Commun., 2000, v.184, N5–6, p.485–491.

1	$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{(\lambda^2 - C)} + \frac{D\lambda^2}{(\lambda^2 - E)} + F\lambda^2$	BBO, Te, Barium Formate, a-HIO ₃ , MgBaF ₄ , Urea, L-PCA
2	$n^2 = A + \frac{B}{(\lambda^2 - C)} + D\lambda^2$	LiIO ₃ , LiNbO ₃ , BeSO ₄ ·4H ₂ O, BBO, KTP, LAP, DLAP, LBO, CLBO, KTA, CBO, SBO, LiInS ₂ , AgGaGeS ₄ , LB ₄ , KABO, LiInSe ₂ , BiBO, GdCOB
3	$n^2 = A + \frac{B}{(\lambda^2 - C)} + D\lambda^2 + E\lambda^4 + F\lambda^6$	LBO
4	$n^2 = A + \frac{B}{(\lambda^2 - C)} + \frac{D}{(\lambda^2 - E)}$	Proustite, HgGa ₂ S ₄ , HgS, AgGaGeS ₄
5	$n^2 = A + \frac{B}{(\lambda^2 - C)} + \frac{D\lambda^2}{(\lambda^2 - E)}$	KDP, DKDP, ADP, DADP, CDA, DCDA, KDA, RDA, RDP, DRDP, ADA, DRDA
6	$n^2 = A + \frac{B}{(\lambda^2 - C)} + \frac{D(\lambda + E)}{(\lambda + F)^2 - K}$	Urea
7	$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{(\lambda^2 - C)}$	RDP, Klin, BeSO ₄ ·4H ₂ O, KB5, Banana, Potass. Niobate, KM, Sodium Nitrate, L-CTT, PNP, DAN, MMONS
8	$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{(\lambda^2 - C)} + D\lambda^2$	LiIO ₃ , LFM, Sodium Formate, KTP, a-HIO ₃ , Sacchoroza, POM, MAP, mNA, RTA, KTA, CTA, FMA, 5-NU, NPP
9	$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{(\lambda^2 - C)} + D\lambda^2 + E\lambda^4$	KDP, DKDP, ADP, DADP, CDA, DCDA, KDA, RDA, RDP, DADA
10	$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{(\lambda^2 - C)} + \frac{D}{\lambda^2} + \frac{E}{\lambda^4} + \frac{F}{\lambda^6}$	GaSe
11	$n^2 = A + \frac{B\lambda^2}{(\lambda^2 - C)} + \frac{D\lambda^2}{(\lambda^2 - E)}$	DKDP, Pirargirite, AgGaS ₂ , AgGaSe ₂ , ZnGeP ₂ , CdGeAs ₂ , GaSe, CdSe, HgS, Te, KTP, TAS
12	13

Теория анионных групп

Chen, C.T., Wu, B.C., Jiang, A.D., and You, G.M.

A new ultraviolet SHG crystal β -BaB₂O₄. Sci. Sin. B, 1985, v.18, N3, p.235–243.

Chen, C.T., Wu, Y.C., and Li, R.K.

The relationship between the structural type of anionic group and SHG effect in boron-oxygen compounds. Chin. Phys. Lett., 1985, v.2, 389–392. (in Chinese).

C.Chen.

Nonlinear Optical Borate Crystals Principals and Applications. 2012

J. Simmons, K.S. Potter. Optical Material. 2000

M.J. Weber. Handbook of Optical Materials. 2000

Стекла ВОЛС

Д.В. Иоргачев, О.В. Бондаренко. Волоконно-оптические кабели и линии связи.

ЭКО-ТРЕНДЗ, Москва, 2002

Зависимость показателя преломления стекол в диапазоне длин волн 0,2...2,0 мкм описывается формулой Селмейера:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 A_i \lambda^2 / (\lambda^2 - l_i^2), \quad (3.1)$$

где A_i, l_i — коэффициенты ряда Селмейера; λ, l_i выражены в микрометрах.

Для изготовления ОВ, используемых в диапазоне длин волн 0,8 ... 1,8 мкм, применяются кварцевые стекла с легирующими добавками окиси германия GeO_2 , фосфора P_2O_3 , повышающими показатель преломления кварца, и добавками окиси бора B_2O_3 , фтора F, понижающими его показатель преломления.