



Исследование материалов для создания акустооптических устройств среднего ИК диапазона

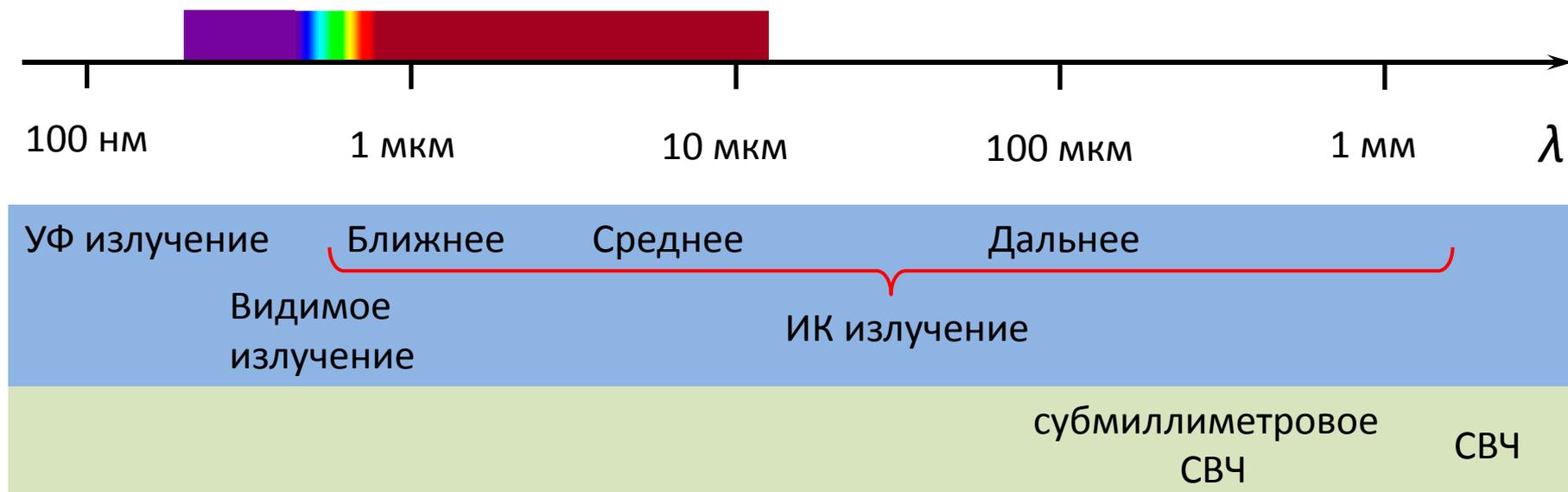
Волошинов В.Б., Балакший В.И., Манцевич
С.Н., Поликарпова Н.В., Дьяконов Е.А., Купрейчик
М.И., Пороховниченко Д.Л., Хоркин В.С.

*МГУ им. М.В. Ломоносова
Физический факультет*

Основные направления исследований группы акустооптики и оптической обработки информации

- Распространение акустических волн и пучков в средах с сильной акустической анизотропией
- Акустооптическое взаимодействие в акустических полях с периодической фазовой модуляцией
- Исследование материалов для создания акустооптических устройств в УФ, среднем и дальнем ИК диапазонах
- Исследование материалов и особенностей акустооптической дифракции в терагерцовом диапазоне
- Изучение акустооптического взаимодействия в оптически двуосных кристаллах
- Исследование функционирования акустооптических систем с оптоэлектронной обратной связью
- Изучение влияния температуры на работу акустооптических устройств
- Визуализация фазовых объектов

Акустооптическое взаимодействие в среднем и дальнем ИК диапазонах



Проблема: расширение диапазона работы акустооптических устройств в длинноволновом направлении

Актуальные задачи:

- поиск АО материалов, прозрачных на длинах волн больших 10 мкм
- изучение акустических и акустооптических свойств этих материалов
- разработка АО устройств для данного диапазона

Работа с ИК излучением в акустооптических устройствах

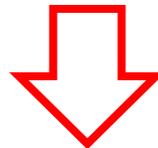
ОСНОВНАЯ ПРОБЛЕМА – ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИФРАКЦИИ

$$I = \left(\frac{\pi l}{\lambda} \right)^2 \frac{PM}{2S}$$

При увеличении длины волны света эффективность дифракции падает:
(по сравнению с эффективностью дифракции на длине волны 0.63 мкм)

10 мкм – в 250 раз

30 мкм – в 2500 раз



Материал не только прозрачный, но и с достаточно высоким АО
качеством

Свойства некоторых кристаллов для ИК акустооптики

АО материал	Диапазон прозрачности, мкм	$M \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ продольная волна	$M \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ сдвиговая волна
Si	1.5...10	6	24
Ge	1.5...22	190	290
KRS-5 (TlBr-TlI)	0.53...45	1150	1200
KRS-6 (TlCl-TlBr)	0.4...30	715	880
PbBr ₂	0.36...30	550	n/a
Hg ₂ Cl ₂	0.35...20	540	640
Hg ₂ Br ₂	0.40...30	n/a	2600
Hg ₂ I ₂	0.45...40	максимальное качество 3200	
InI	0.62...50	1100	n/a
Te	4.0...20.0	?	?
Tl ₃ AsSe ₃	1.1...17	максимальное качество 2900	
Tl ₃ AsS ₄	0.6...12	?	?

Исследование кристалла теллура

оптические характеристики теллура

Френелевские потери



$$R_e = 43\%, R_o = 52\%$$

$$n_o = 4.8$$

Углы Брюстера

$$n_e = 6.25$$



$$81^\circ \text{ и } 78^\circ$$

$$\Delta n = 1.45$$

Углы полного



внутреннего отражения

$$9.2^\circ \text{ и } 12^\circ$$

Достаточно большое оптическое поглощение и оптическая активность (12° мм^{-1})

Dixon R.W., Chester A.N. "An acoustic light modulator for $10.6 \mu\text{m}$ " *Appl. Phys. Lett.* 1966 **9** 190

Diakonov A.M., Ilisavsky Y.V. and Farbstein I.I. "Efficient acousto-optic modulator on base of tellurium" *Sov. Tech. Phys. Lett.* 1977 **3** 564

Loferski J.J. "Infrared optical properties of single crystals of tellurium" *Phys. Rev.* 1954 **93** 707

Исследование кристалла теллура

акустические свойства

Класс 32, тригональная сингония

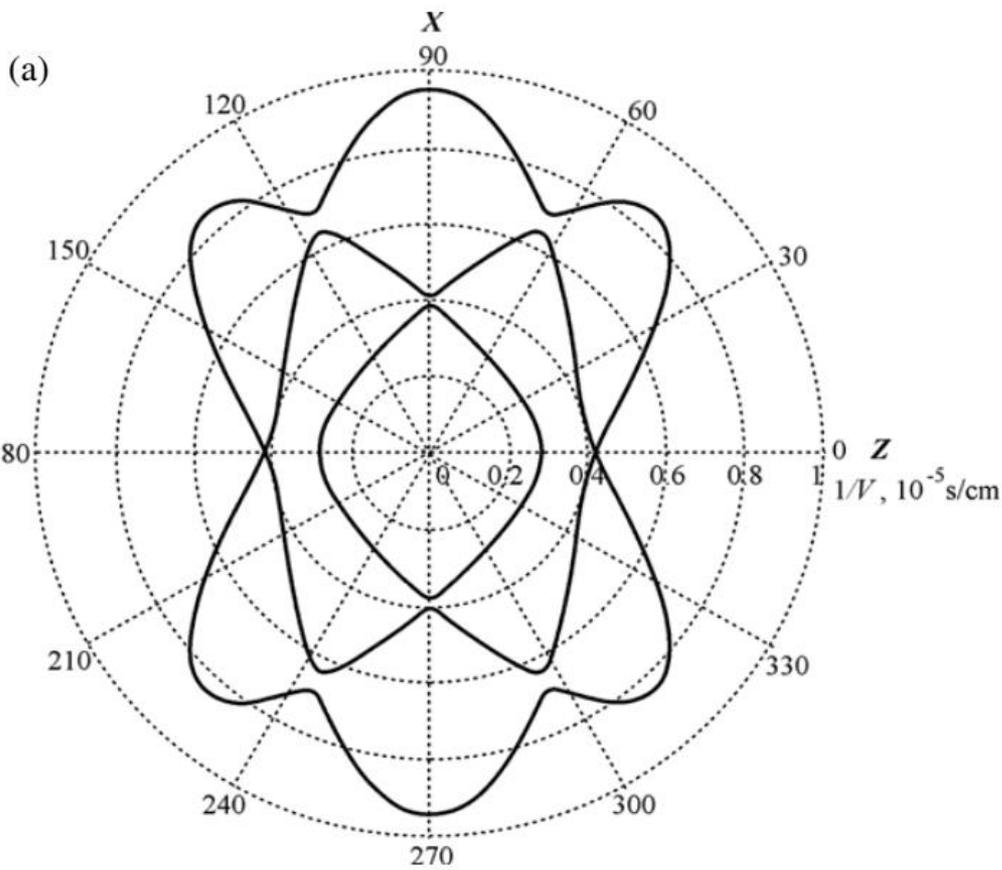
$$c_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & c_{66} \end{pmatrix} \times 10^{10} \text{ дин см}^{-2}$$
$$\begin{aligned} c_{11} &= 37.6 \\ c_{12} &= 9.4 \\ c_{13} &= 28.8 \\ c_{14} &= 14.3 \\ c_{33} &= 78.5 \\ c_{44} &= 35.4 \end{aligned}$$

Uchida N. and Niizeki N. "Acoustooptic deflection materials and techniques" *Proc. IEEE* 1973 **61** 1073–92

Gorley P., Kushnir I. and Shenderovsky V. "Acoustic and piezoelectric properties of tellurium single crystals" *Ukr. J. Phys.* 1989 **34** 102–9

Исследование кристалла теллура

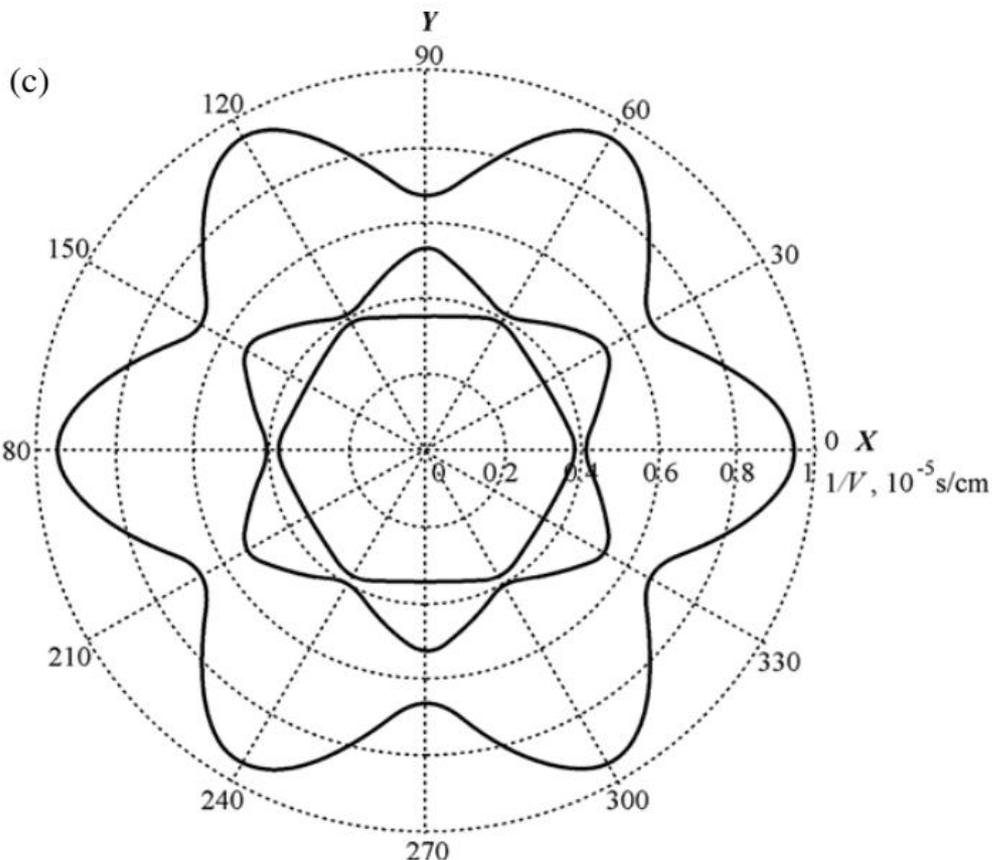
акустические свойства



направление	скорость, м/с
X	$V_{SS} = 1050$
X	$V_{FS} = 2610$
X	$V_L = 2450$
Z	$V_{SS} = 2380$
Z	$V_L = 3540$

Исследование кристалла теллура

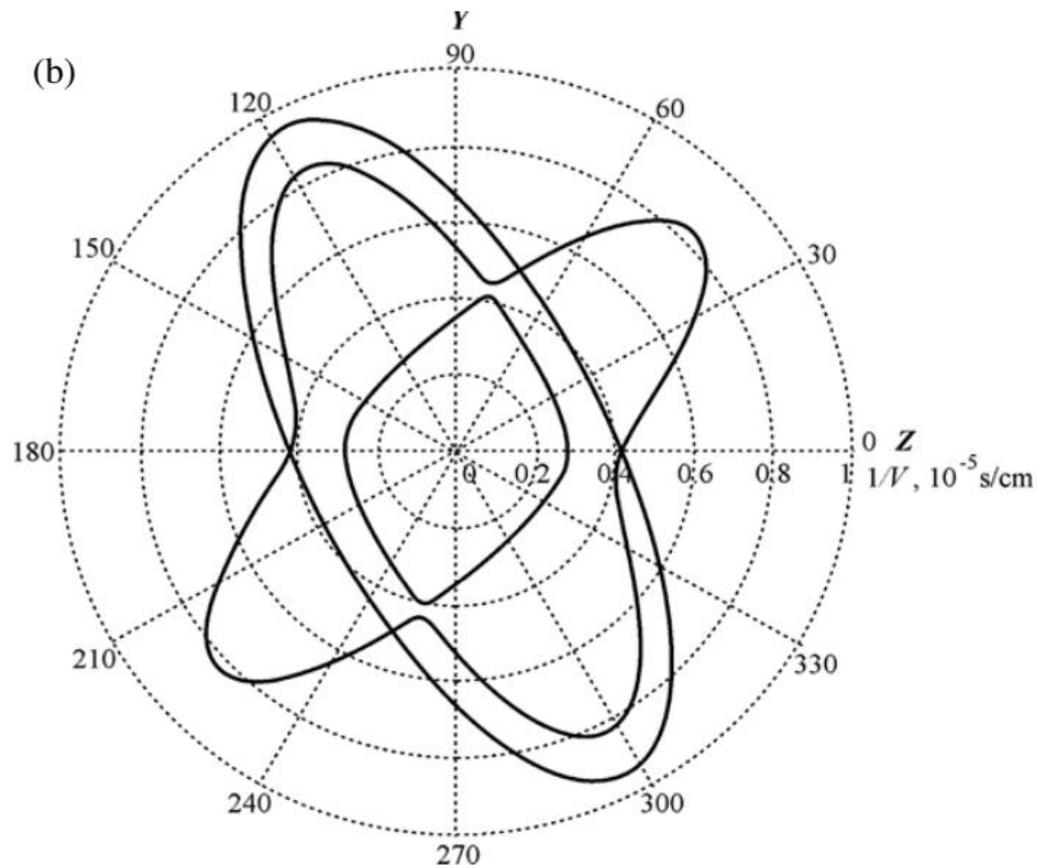
акустические свойства



направление	скорость, м/с
X	$V_{SS} = 1050$
X	$V_{FS} = 2610$
X	$V_L = 2450$

Исследование кристалла теллура

акустические свойства



направление	скорость, м/с
116.5°	$V_{SS} = 1050$
Y	$V_{SS} = 1500$
Y	$V_{QS} = 1800$
Y	$V_{QL} = 2800$

Исследование кристалла теллура

акустооптические свойства

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & -p_{14} & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{31} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & -p_{41} & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{14} & p_{66} \end{pmatrix}$$

$$p_{11} = 0.164$$

$$p_{12} = 0.138$$

$$p_{13} = 0.146$$

$$p_{14} = -0.04$$

$$p_{31} = -0.086$$

$$p_{33} = 0.038$$

$$p_{41} = 0.28$$

$$p_{44} = 0.14$$

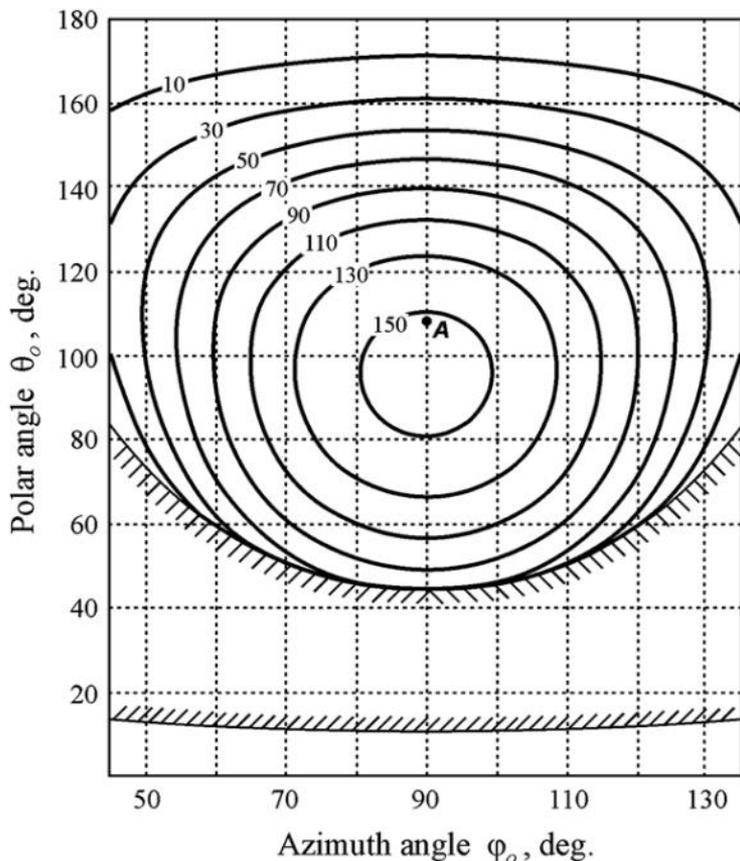
$$p_{66} = 0.013$$

Исследование кристалла теллура

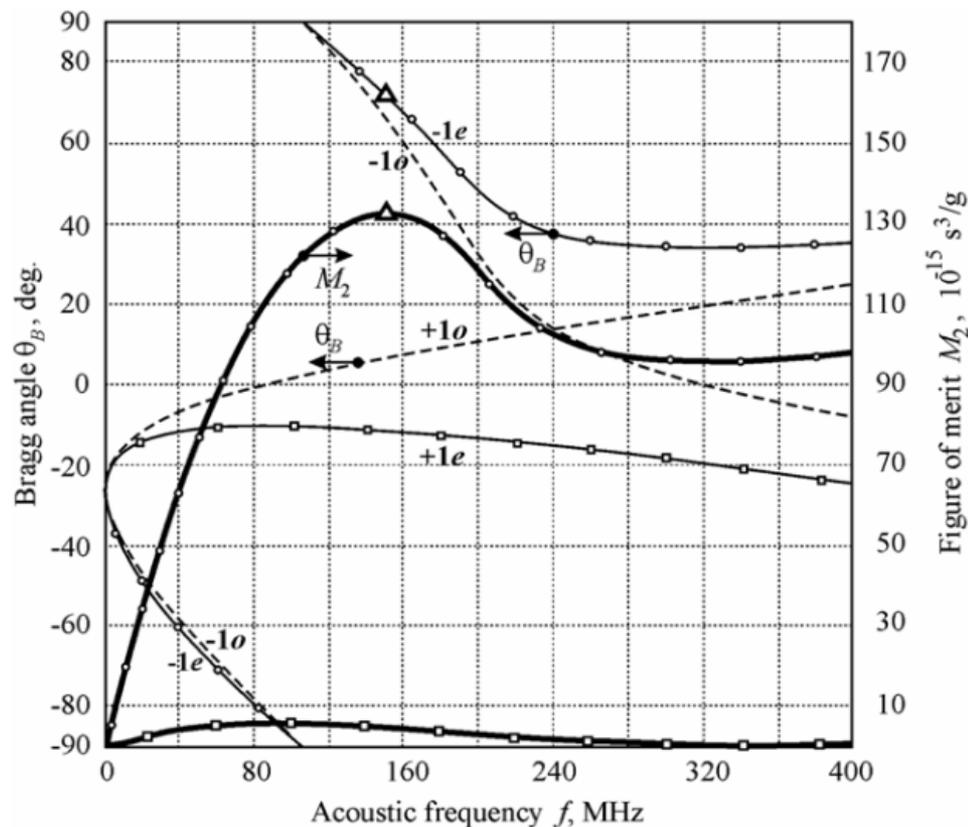
акустооптические свойства

Плоскость YZ наиболее предпочтительна для создания АО устройств, в том числе фильтров

АО качество



АО характеристики, медленная мода 116.5°



Исследование кристалла теллура

Акустооптическая дифракция

Acoustic propagation angle θ_a (deg)	Acoustic walkoff angle α (deg)	Acoustic phase velocity V (10^5 cm s $^{-1}$)	Optic polar angle θ_0 (deg)	Bragg angle of incidence θ_B (deg)	Angle of diffraction θ_d (deg)	Figure of merit M_2 (10^{-12} s 3 kg $^{-1}$)	Acoustic frequency f (MHz)
107	37	1.13	65	48	34.7	130	175
105	40	1.16	51	36	21.1	95	166
103	43	1.19	43	30	15.7	70	154
100	45	1.26	34	24	12	45	130
98	46	1.30	27	19	9	28	110
93	46	1.45	11	7	3	3	47
80	41	1.70	-34	-23	-11	11	177

Максимальное АО качество в плоскости YZ достигается для сдвиговой волны, распространяющейся под углом 108°;

$$M=160\,000 \times 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг};$$

световая волна распространяется под углом 96°

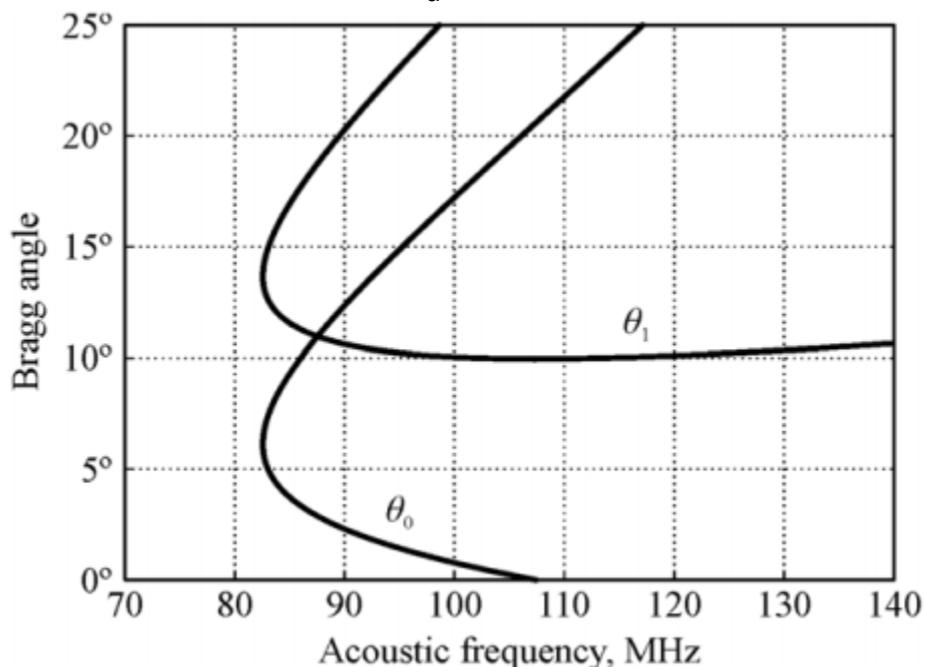
Этот вариант не применим из-за большого поглощения света

Исследование кристалла теллура

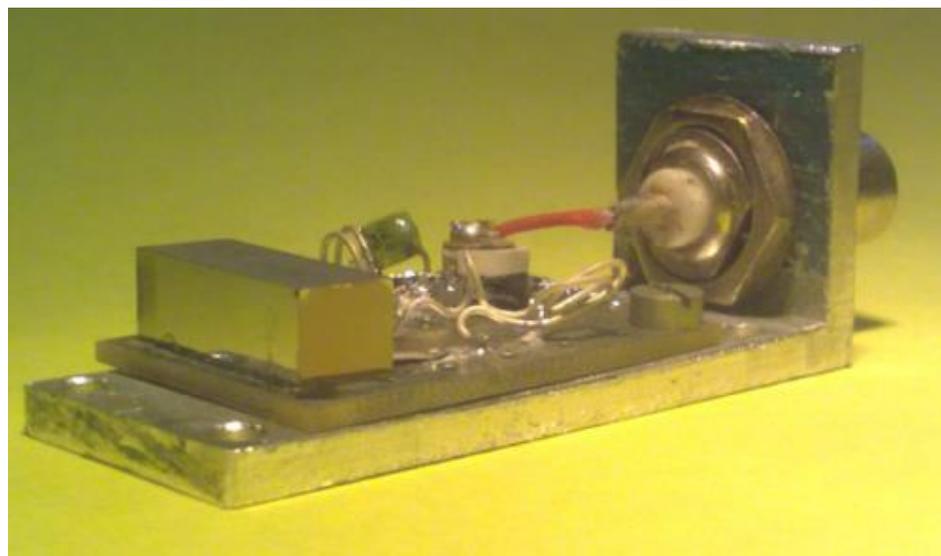
АО фильтр

Угlochастотные характеристики

$$\theta_a = 95.8^\circ$$



АО ячейка



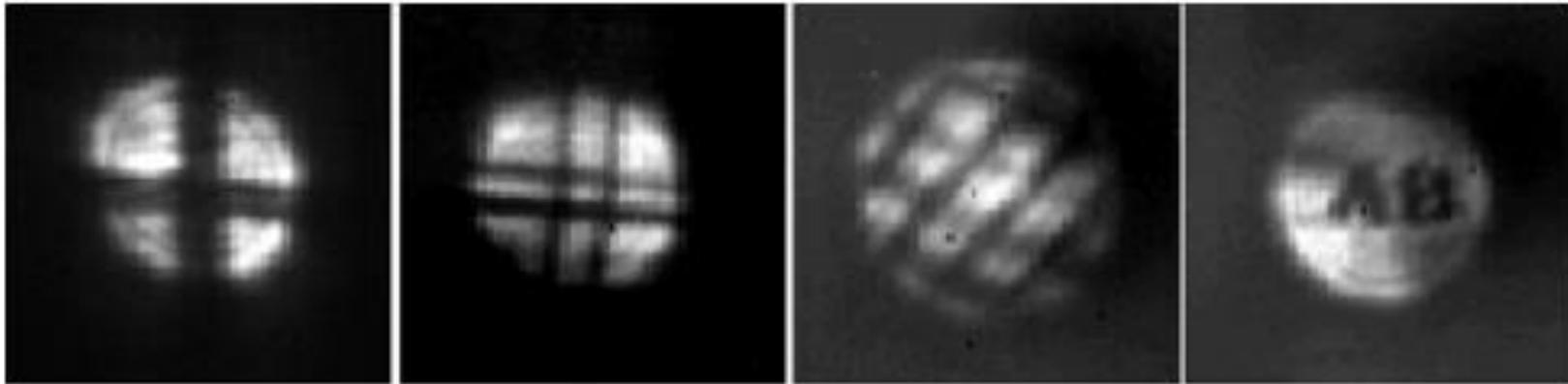
Gupta N., Voloshinov V.B., Knyazev G.A. and Kulakova L.A. "Optical transmission of single crystal tellurium for application in acousto-optic cells" *J. Opt.* **13** (2008) 055702

Gupta N., Voloshinov V.B., Knyazev G.A. and Kulakova L.A. "Tunable wide-angle acousto-optic filter in single-crystal tellurium" *J. Opt.* **14** (2012) 035502

Исследование кристалла теллура

АО фильтр

Получение изображений



$$R = \lambda / \delta\lambda = 83$$

Исследование кристалла теллура

Теория

$$M = 2300$$

$$P_a = 1Bm$$

$$I_d/I_i = 0.18$$

Эксперимент

$$P_a = 1Bm$$

$$I_d/I_i = 0.045$$

$$P_a = 1.5Bm$$

$$I_d/I_i = 0.066$$

$$P_a = 2.0Bm$$

$$I_d/I_i = 0.09$$



M меньше, чем дает теоретический расчет

АО дифракция в плоскости YZ

$$p_{eff} = (p_{41} \sin \alpha - p_{44} \sin \alpha) \sin(\theta + \alpha) + (p_{14} \sin \alpha - p_{66} \cos \alpha) \cos(\theta + \alpha)$$

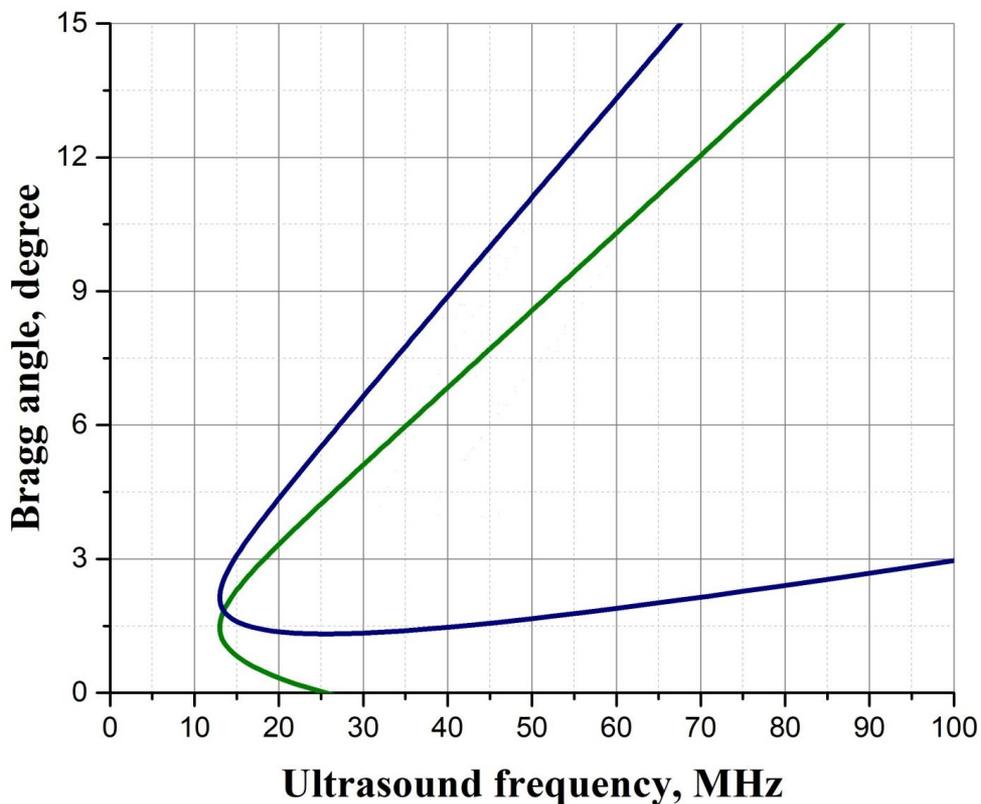


Вероятно коэффициенты p_{ij} определены неверно, скорее всего p_{41} !

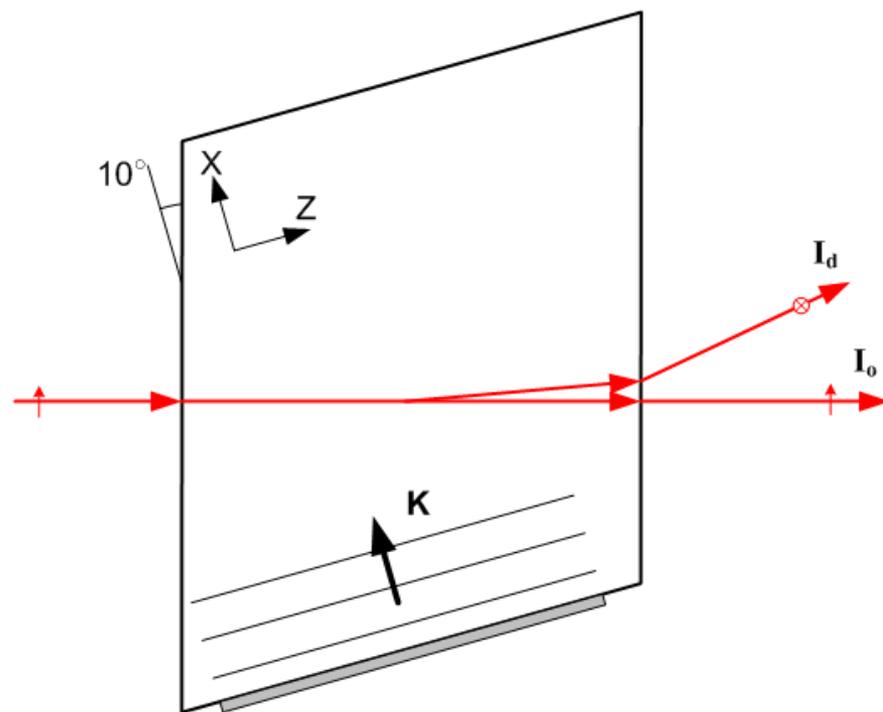
Исследование кристалла теллура

Уточнение константы p_{41}

АО дифракция в плоскости XZ



$$p_{eff} = p_{41} \sin \vartheta$$

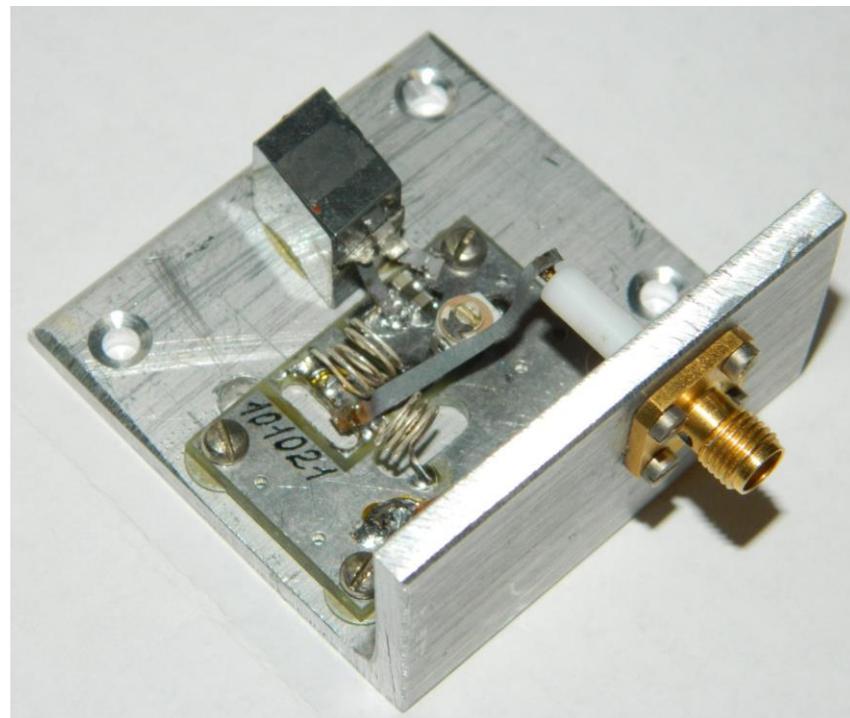
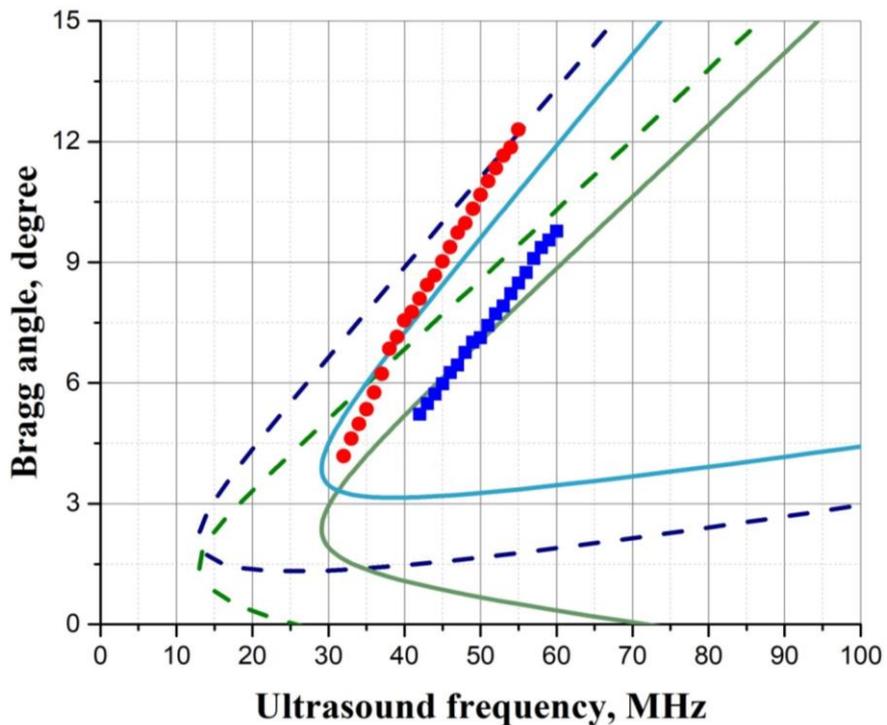


Исследование кристалла теллура

Уточнение константы p_{41}

$$p_{41} = 0.16 \pm 0.03$$

$$p_{41} = 0.28$$

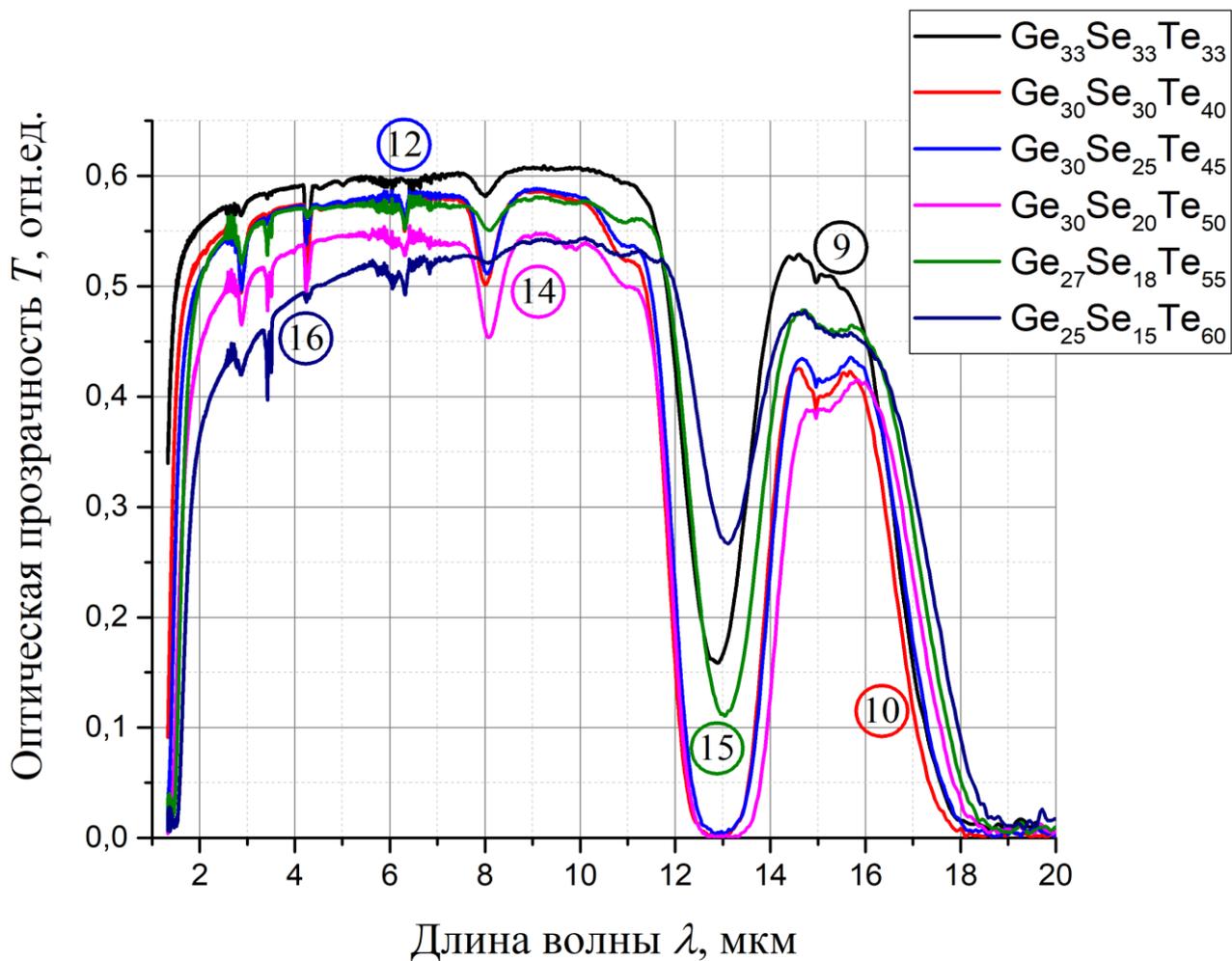


Исследование АО свойств теллуровых стекол

Исследованы физические свойства стекол германия-селена-теллура. Стекла были получены в физико-техническом институте им. Иоффе



Исследование АО свойств теллуровых стекол



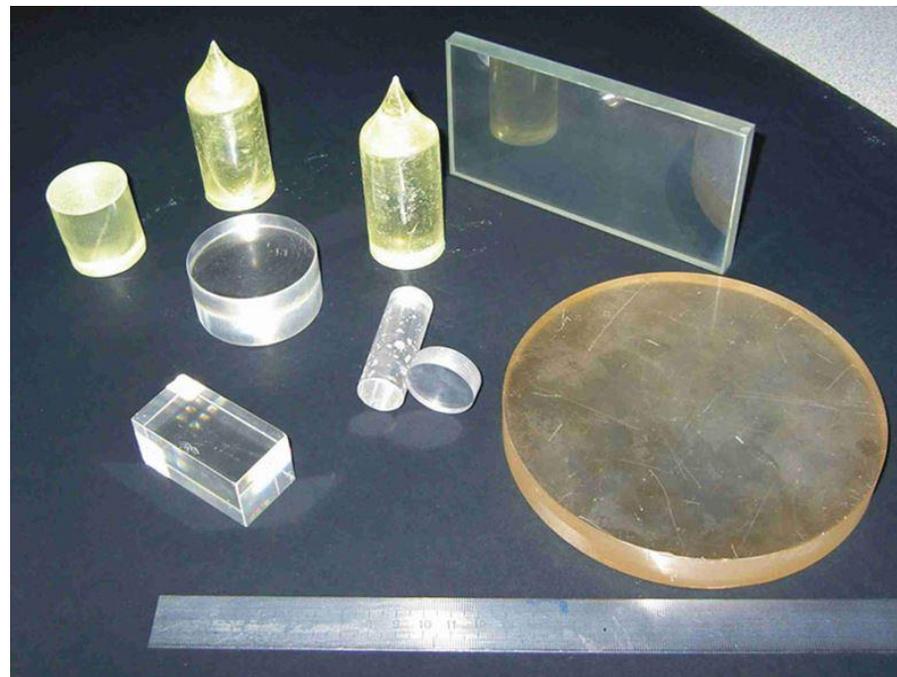
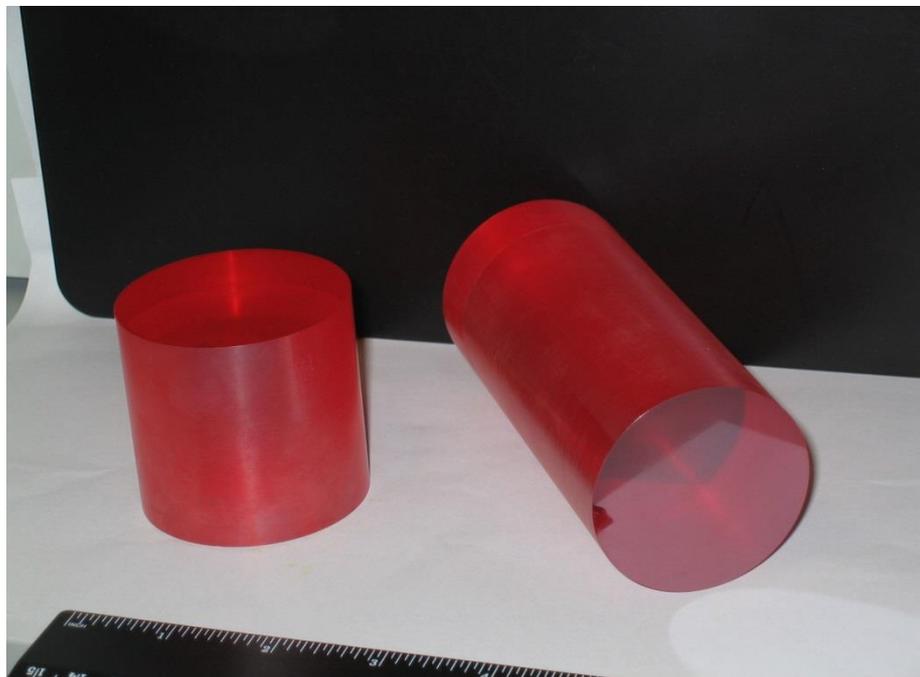
Исследование АО свойств теллурических стекол

Стекло	Плотность ρ , г/см ³	Скорость v , 10 ⁵ см/с	c_{11} , 10 ¹⁰ дин/см	$M_{2\perp}$, 10 ⁻¹⁸ с ³ /Г	$M_{2\parallel}$, 10 ⁻¹⁸ с ³ /Г
Ge ₃₃ Se ₃₃ Te ₃₃	4.92 ± 0.15	2.23 ± 0.02	24.5 ± 0.8	290 ± 60	390 ± 130
Ge ₃₀ Se ₃₀ Te ₄₀	5.02 ± 0.09	2.20 ± 0.02	24.1 ± 0.4	240 ± 40	420 ± 100
Ge ₃₀ Se ₂₅ Te ₄₅	5.0 ± 0.1	2.20 ± 0.03	24.2 ± 0.7	240 ± 40	440 ± 100
Ge₂₅Se₁₅Te₆₀	5.23 ± 0.07	2.05 ± 0.01	22.0 ± 0.3	700 ± 160	1330 ± 300
Si₂₀Te₈₀	5.06 ± 0.06	2.00 ± 0.05	23.0 ± 0.5	770 ± 150	1150 ± 400

Исследование свойств KRS-5

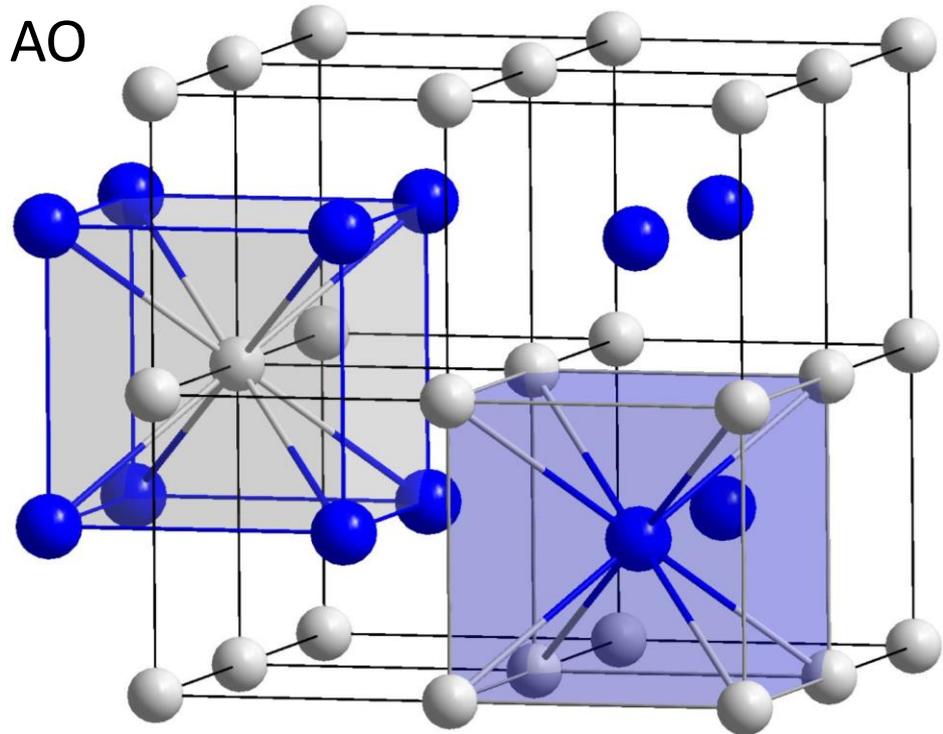
KRS (*Kristalle aus dem Schmelzfluss*) – семейство синтетических кристаллов, разработанных в Германии в начале 40х годов 20 в. для изготовления ИК оптических элементов.

Кристалл	KRS-5	KRS-6	KRS-11	KRS-13	KRS-15
Состав	TlBr(58%)/ TlI(42%)	TlBr(67%)/ TlCl(38%)	AgBr(50%)/ AgCl(50%)	AgBr(75%)/ AgCl(25%)	TlBr(20%)/ TlCl(80%)



Исследование свойств KRS-5

- синтетические кристаллы
- твердые растворы галогенидов таллия и серебра
- кубическая решетка, класс $m\bar{3}m$
- легко поддаются обработке
- нерастворимы в воде не гигроскопичны
- KRS-5 за счет большего показателя преломления обладает лучшими АО свойствами чем KRS-6



Исследование свойств KRS-5

Общие свойства кубического кристалла KRS-5 (m3m)

диапазон прозрачности $\lambda = 0.55-50 \mu\text{m}$

$\rho = 7370 \text{ кг/м}^3$ - плотность материала,

$n = 2.57$ ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$), $n = 2.36$ ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) - показатель преломления

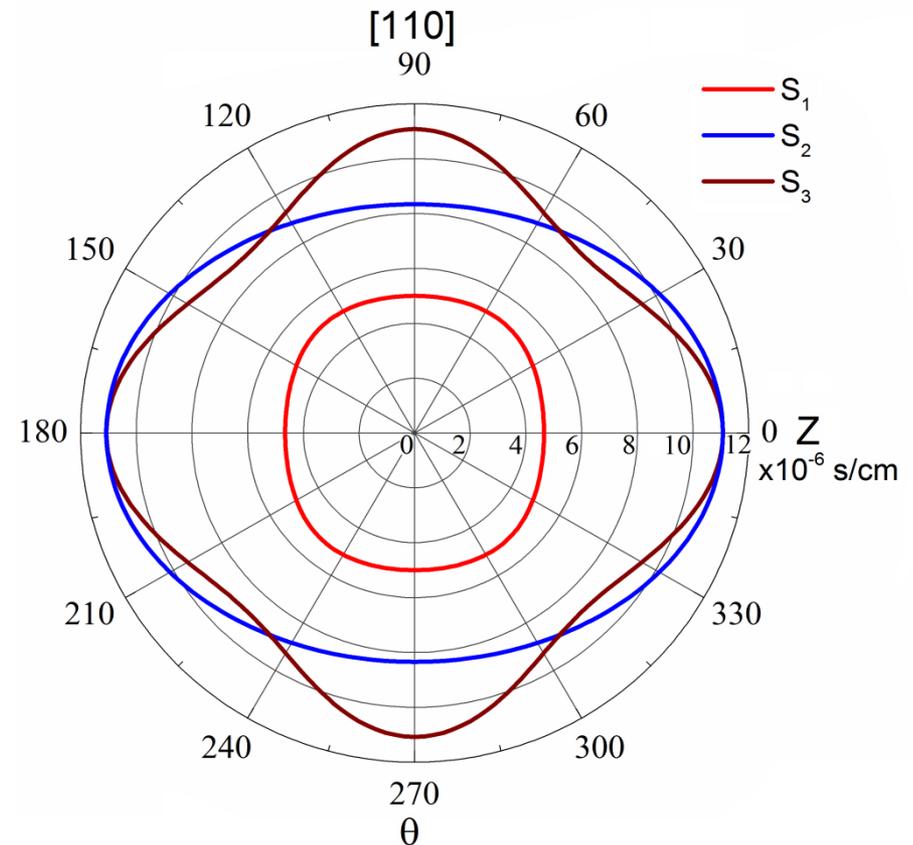
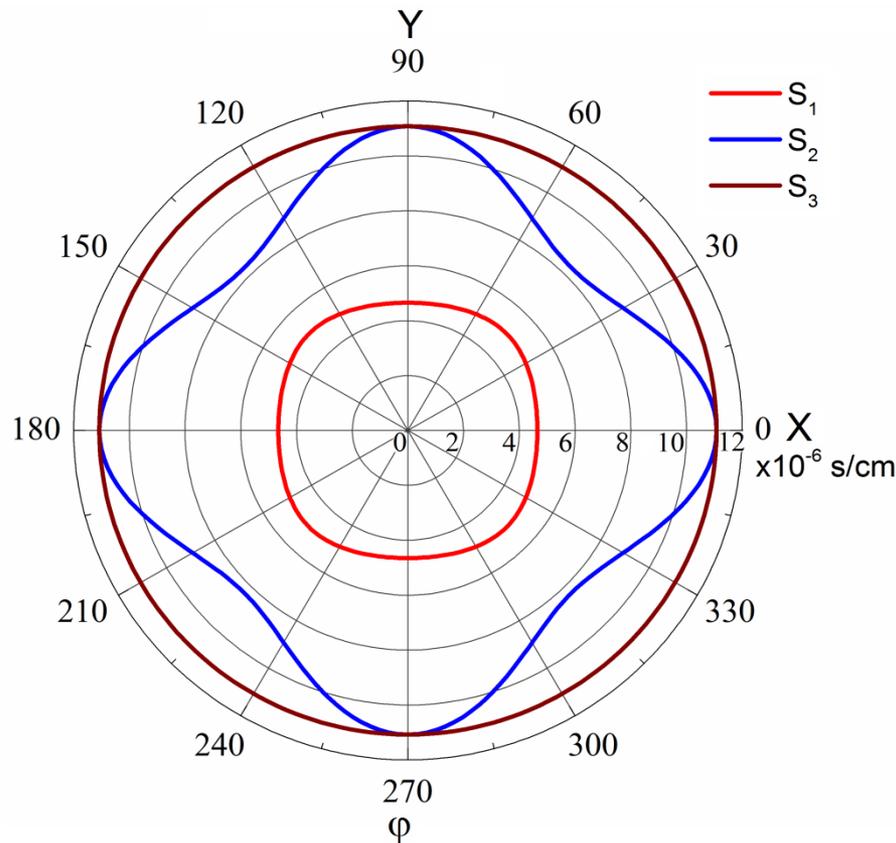
$$c_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{pmatrix}, \quad p_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{pmatrix}$$

$$c_{11} = 3.31 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \quad c_{12} = 1.32 \cdot 10^{10} \text{ Па} \\ c_{44} = 0.579 \cdot 10^{10} \text{ Па}^*$$

$$p_{11} = 0.213, \quad p_{12} = 0.144 \\ p_{44} = 0.149$$

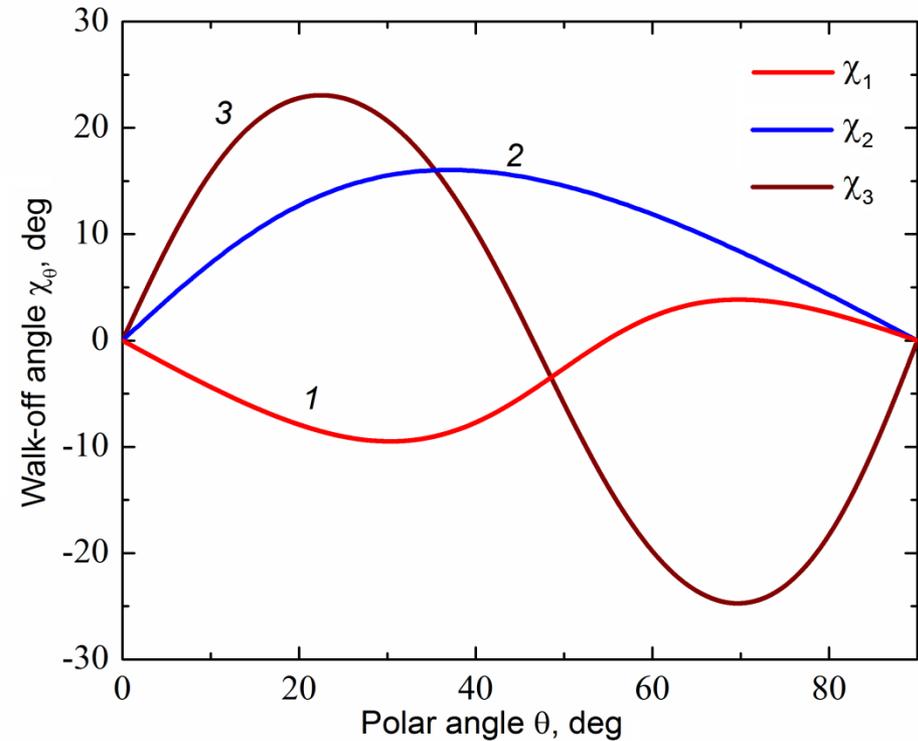
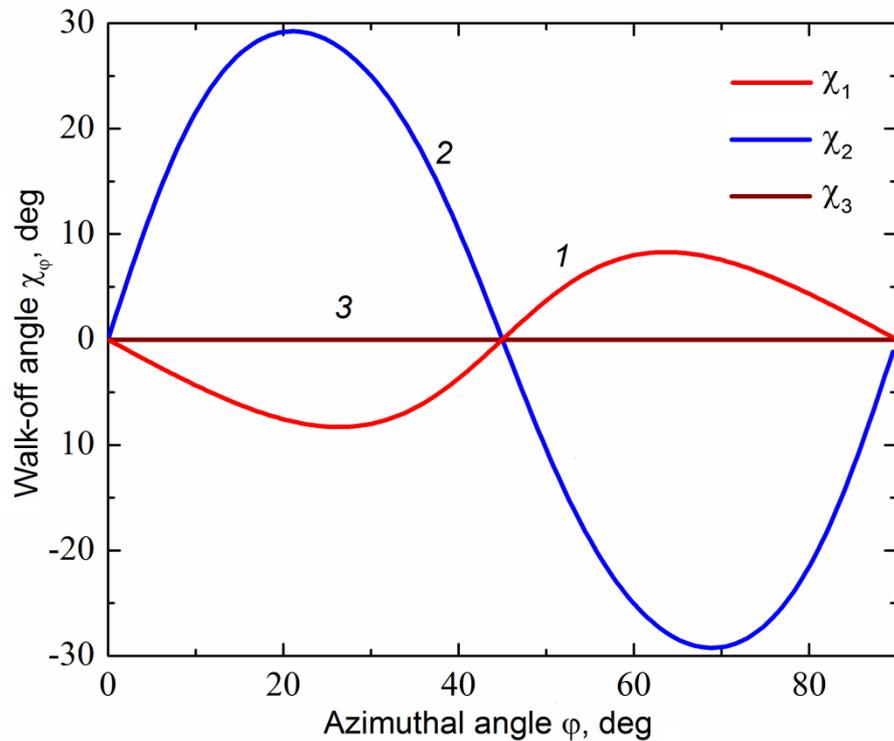
Исследование свойств KRS-5

акустические свойства поверхности обратных скоростей



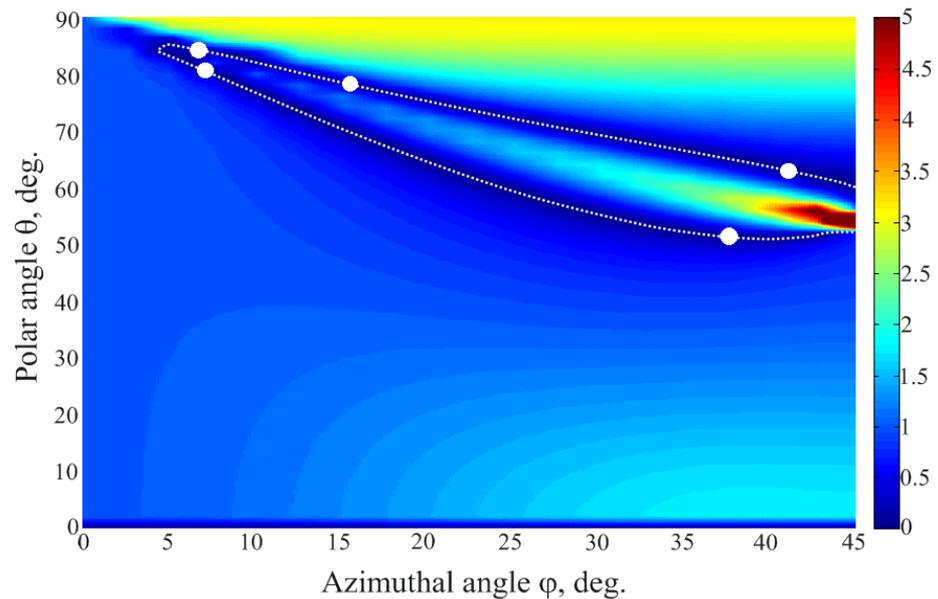
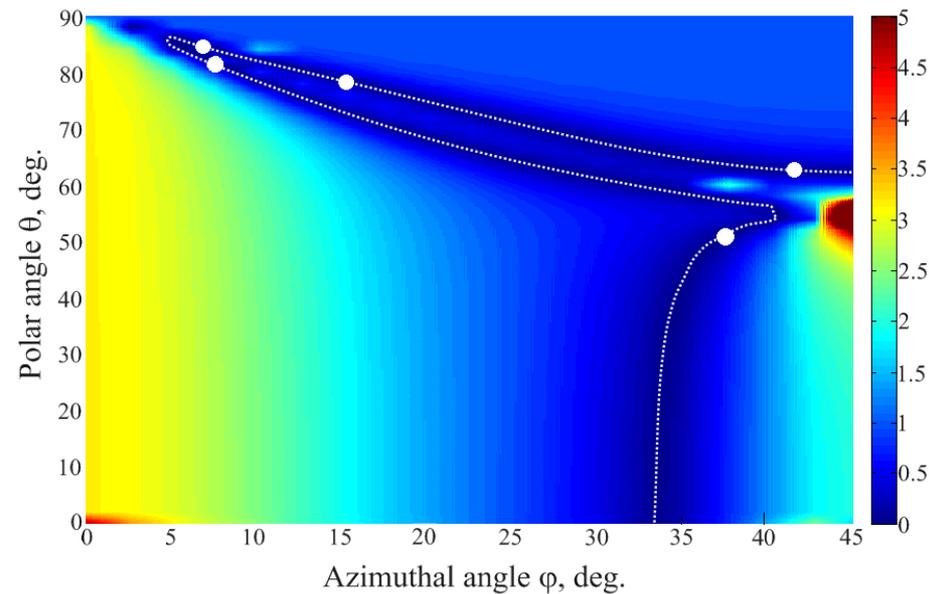
Исследование свойств KRS-5

акустические свойства
углы сноса



Исследование свойств KRS-5

акустические свойства
акустическая анизотропия, медленная мода



№	Азимутальный угол , град.	Полярный угол, град.
1	5.9	84.4
2	7.8	83.8
3	15.3	78.2
4	37.6	51.2
5	41.9	62.4

Исследование свойств KRS-5

акустические свойства

Направление распространения	Акустическая мода	Скорость v , м/с	Поляризация акустической моды	Литература* v , м/с
[100]	L	2110	[100]	2000
	S	886	[010]	900
	S	886	[001]	900
[110]	L	1980	[110]	-
	FS	1160		1200
	SS	886	[001]	900
[111]	L	1930	[111]	1920
	FS	1080		-
	SS	1080		-

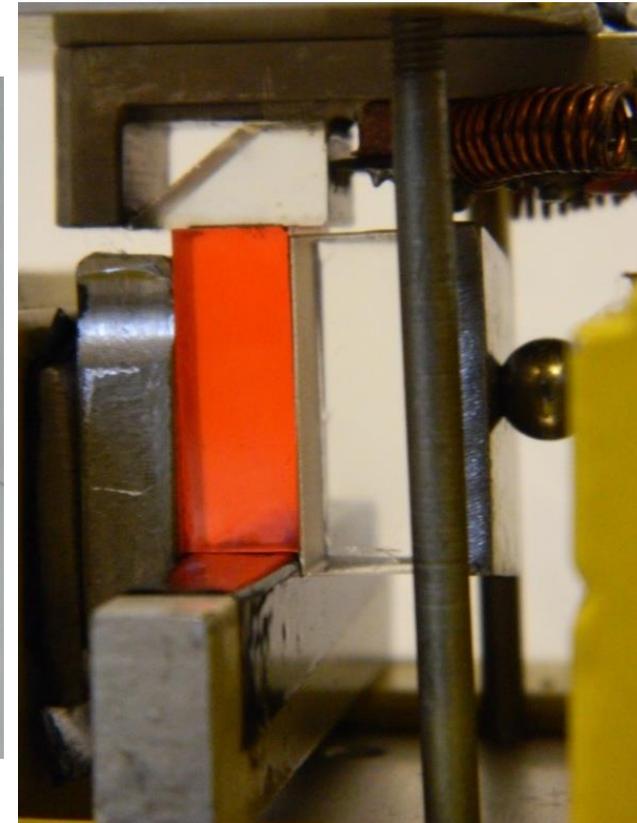
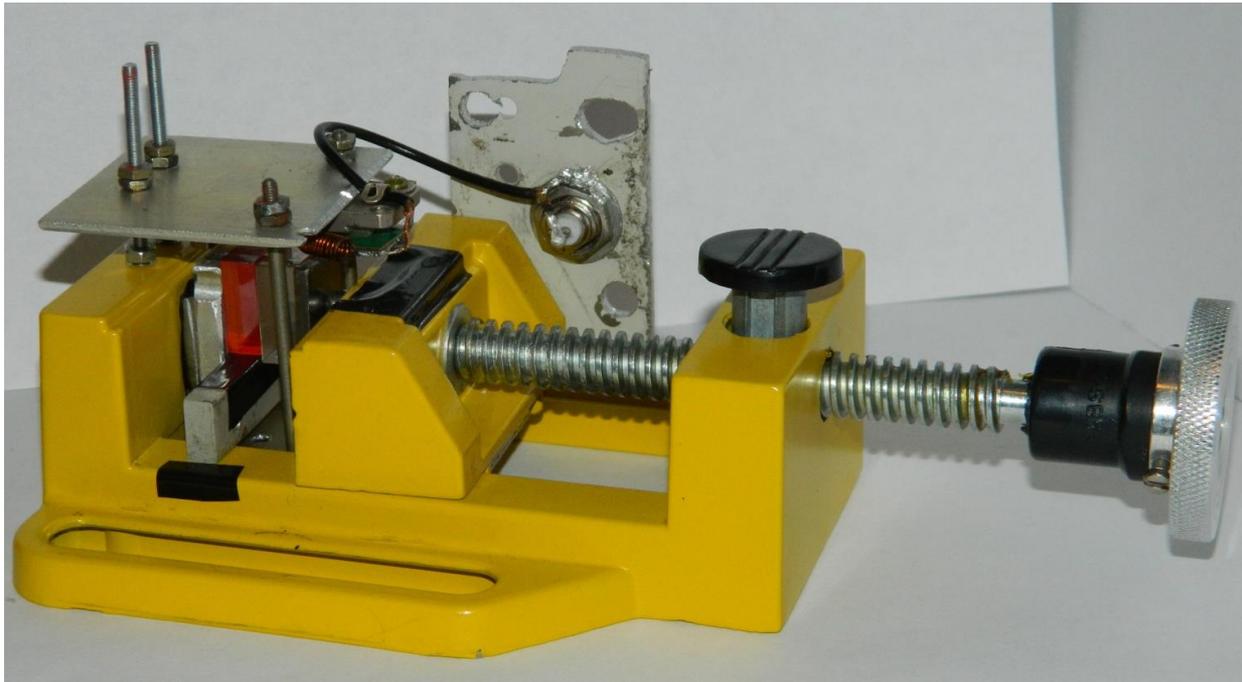
Исследование свойств KRS-5

акустооптические свойства

	Акустическая мода	Направление, поляризация света	P_{eff}	M_2 , $10^{-15} \text{с}^3 \Gamma^{-1}$
[100]	L	[001], [100]	P_{11}	200
		[001], [010]	P_{12}	90
	S [010]	[001]	<i>анизотр: p_{44}</i>	1250
	S [001]	[010]	<i>анизотр: p_{44}</i>	1250
[110]	L	[001], [110]	$(p_{11} + p_{12} + 2p_{44})/2$	540
		[001]	$(p_{11} + p_{12} - 2p_{44})/2$	5
		[110]	P_{12}	100
	FS	[001]	<i>анизотр: $(p_{11} - p_{12})/2$</i>	30
	SS		<i>анизотр: p_{44}</i>	1250
[111]	L	[111]	$(p_{11} + 2p_{12} + 4p_{44})/3$	720
			$(p_{11} + 2p_{12} - 2p_{44})/3$	30

Исследование свойств KRS-5

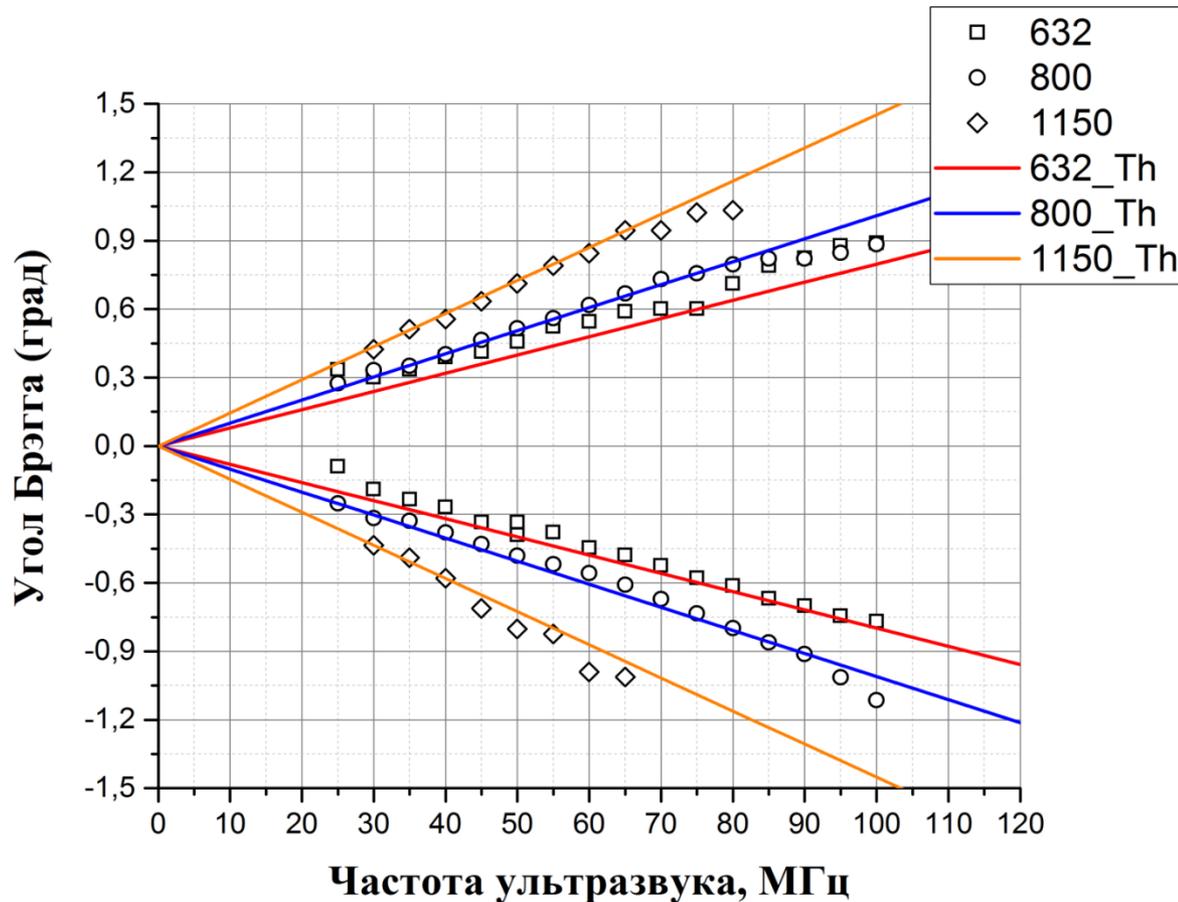
наведенная оптическая анизотропия



Balakshy V.I., Zotov E.I., Parygin V.N. "Anisotropic diffraction of light in a medium with an induced anisotropy" *Sov. J. Quantum Electron.*, 1976 **6** p.1195

Исследование свойств KRS-5

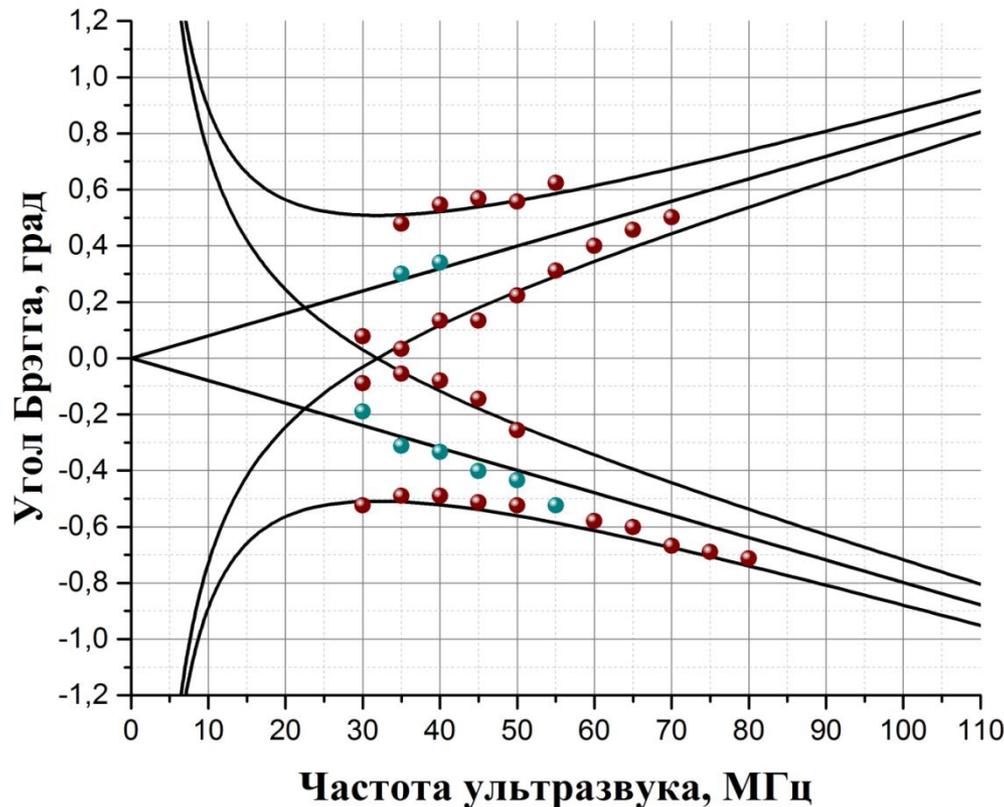
наведенная оптическая анизотропия



Зависимость угла Брэгга от частоты ультразвука при дифракции на сдвиговой акустической волне в кристалле KRS-5 на длинах волн 632, 800 и 1150 нм.

Исследование свойств KRS-5

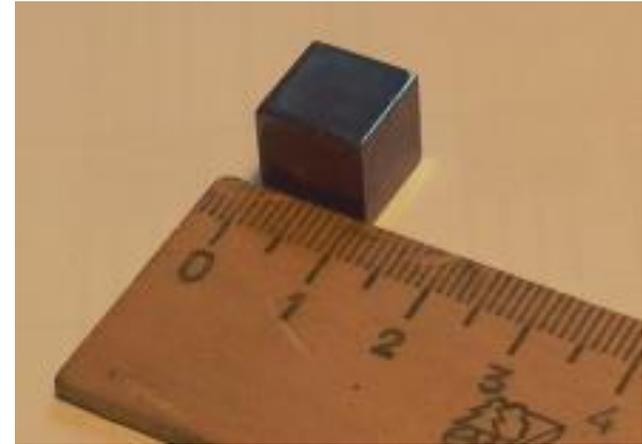
наведенная оптическая анизотропия



Зависимость угла Брэгга от частоты ультразвука при дифракции на сдвиговой акустической волне в кристалле KRS-5 на длине волны 632 нм. $P_{\text{static}} = 60 \text{ атм}$, $S_{\text{st}} = 2 \cdot 10^{-4}$

Исследование кристалла йодида индия

- выращен недавно
- ромбическая решетка
- легко поддается обработке
- гигроскопичен
- прозрачен в диапазоне 0.62-50мкм
- показатели преломления на данный момент не известны



акустические свойства

Параметры ультразвуковой волны			Компонента тензора упругой жесткости
Направление	Поляризация	Скорость, м/с	
X	X	2230±50	$C_{11} = (2.65 \pm 0.15) \times 10^{10} \text{ Н/м}^2$
Y	Y	1960±50	$C_{22} = (2.04 \pm 0.15) \times 10^{10} \text{ Н/м}^2$
Z	Z	2180±50	$C_{33} = (2.53 \pm 0.15) \times 10^{10} \text{ Н/м}^2$

Исследование кристалла йодида индия

акустооптические свойства

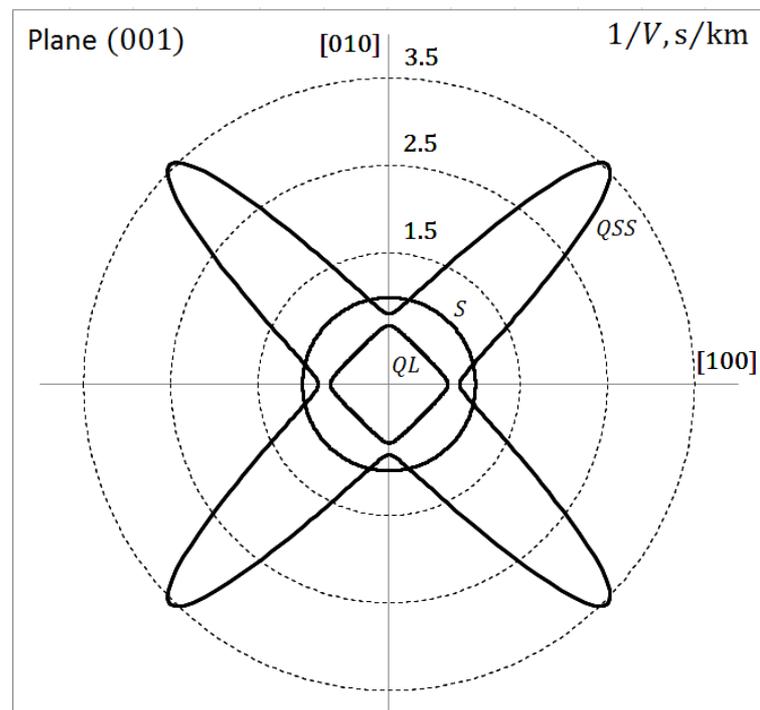
Ультразвуковая волна		Электромагнитное излучение		$M_2 \times 10^{15}, \text{с}^3/\text{кг}$		$\rho_{\text{эфф}}$	n
Направл.	Поляр.	Направл.	Поляр.	1,15 мкм (2017)	0,65 мкм (2019)		
x	x	z	x	1100 ± 200		ρ_{11}	n_x
		y			1100 ± 100		
y	y	z	x	120 ± 25		ρ_{12}	
z	z	y	x		300 ± 50	ρ_{13}	
x	x	z	y	90 ± 20		ρ_{21}	
		y		260 ± 50		ρ_{22}	
y	y	x	y	230 ± 20			
z	z	x	y		80 ± 10	ρ_{23}	
x	x	y	z		110 ± 25	ρ_{31}	n_z
y	y	x	z		110 ± 10	ρ_{32}	
z	z	x	z		860 ± 80	ρ_{33}	

Исследование кристалла бромида ртути

- прозрачен в диапазоне 0.40...30 мкм
- угол сноса для медленной моды более 70°
- большая акустическая анизотропия
- показатели преломления и двулучепреломление больше чем у Hg_2Cl_2
- Минимальная скорость ультразвука 282 м/с
- Возможность создания широкоапертурного фильтра



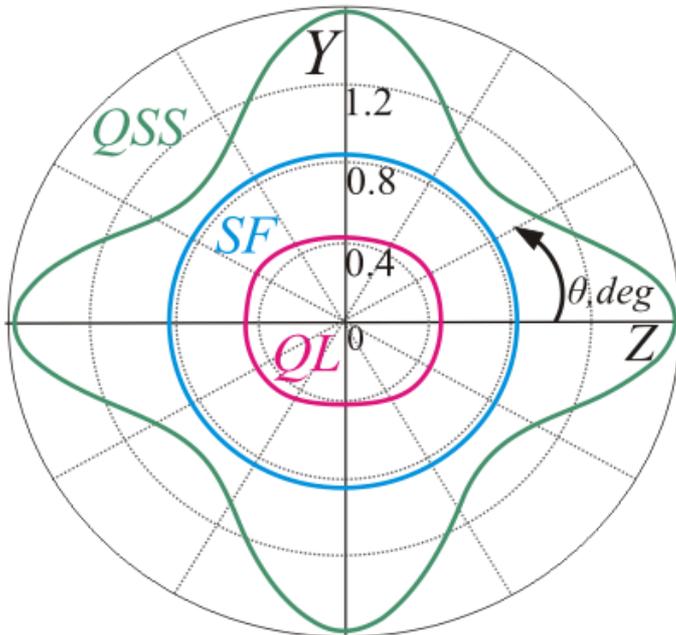
Длина волны, мкм	n_o	n_e
0.42	2.305	2.703
0.63	2.12	2.98
1.06	2.07	2.80
10.6	2.03	2.70
30	2.033	2.700



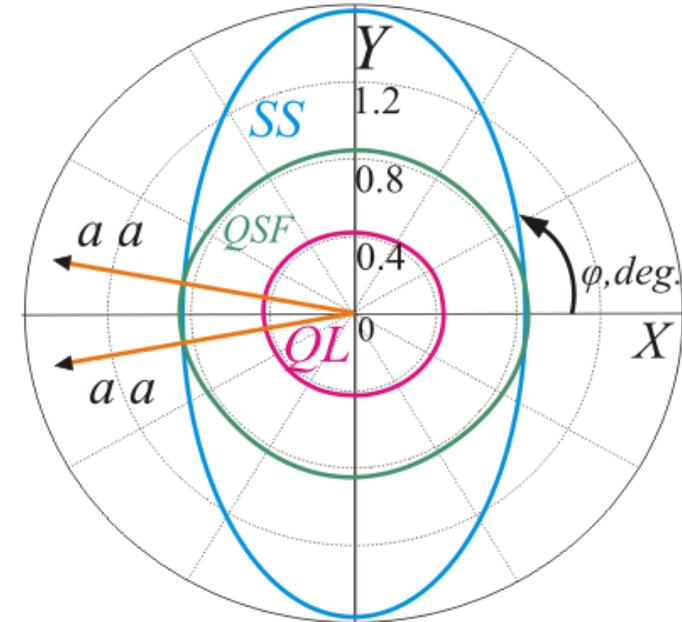
Исследование кристалла Tl_3AsS_4

- ромбическая симметрия, класс mmm
- прозрачен в диапазоне 0.6...12 мкм
- оптически двуосный
- в главных плоскостях дифракция только на сдвиговой акустической волне
- углы сноса не более 35°
- акустическая анизотропия средняя

$V^l, 10^{-5} \text{ s/m}$



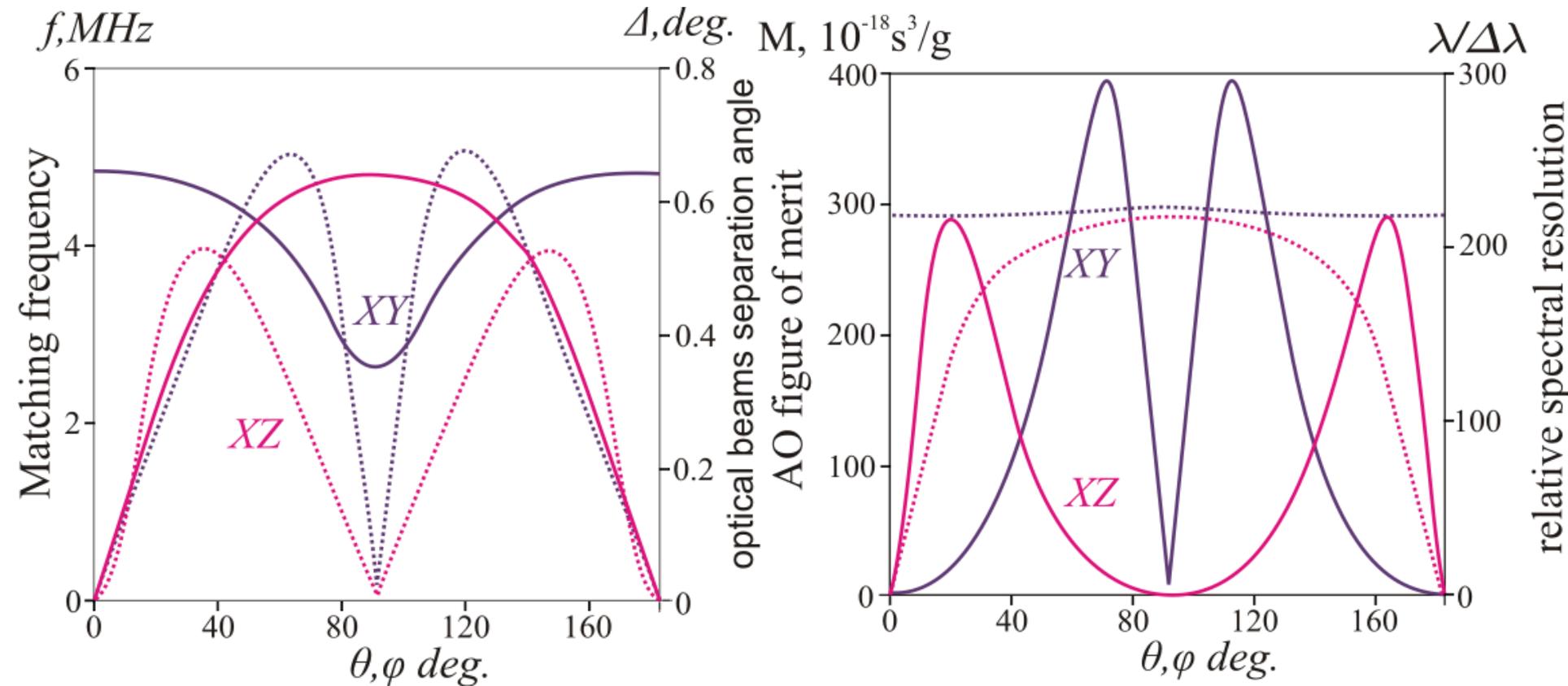
$V^l, 10^{-5} \text{ s/m}$



Длина волны, мкм	n_x	n_y	n_z	ψ
0.633	2.829	2.825	2.774	15.43(XZ)
1.553	2.603	2.599	2.566	19.01(XZ)
3.38	2.567	2.569	2.525	12.16(XZ)
5.3	2.556	2.560	2.513	16.74(XZ)
10.6	2.542	2.541	2.498	8.55(XZ)

Исследование кристалла Tl_3AsS_4

Квазиколлинеарная дифракция



Спасибо за внимание!