

ПОЛЯРИЗАЦИЯ НА СВЕТИНАТА ПРИ ПРЕМИНАВАНЕТО И ПРЕЗ АНИЗОТРОПНИ ДИЕЛЕКТРИЧНИ СРЕДИ

1. Двойнолъчепречупване

а) Закономерността при разпространение на светлината в някаква среда (изотропна или анизотропна) се определя от интерференцията на вторичните вълни, излъчени от частиците (молекули, атоми или йони) на средата, вследствие на тяхната електронна поляризация под действие на електрическото поле \vec{E} на първичната светлинна вълна. **Затова, оптичките свойства на средата се определят от електрическите свойства на тези елементарни излъчватели, тяхното взаимно разположение и взаимодействието помежду им.** Газовете, течностите и аморфните твърди тела са оптически изотропни.

Оптичката анизотропност на кристала зависи не само от електрическата анизотропност на частиците, но и от анизотропността на силите на взаимодействие между частиците, която зависи от степента на симетрия на кристалната решетка. Само кристалите от кубичната сингония (NaCl) са оптически изотропни. Всички останали кристали, независимо от електрическите свойства на частиците им са оптически анизотропни.

Разглеждаме разпространението на светлината в анизотропни кристали.

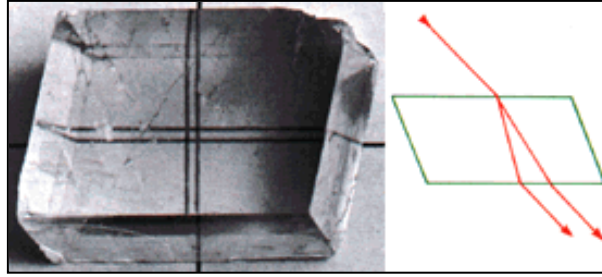
б) Вместо интерференция на вторичните вълни ще използваме по-простия метод, на основата на теорията на Максвел за променливо електромагнитно поле, където кристалът се разглежда като еднородна среда с диелектрическа възприемчивост χ_{ij} и относителна диелектрична проницаемост $\varepsilon_{ij} = \delta_{ij} + \chi_{ij}$, които не са еднакви във всички направления.

Ако $\mu = 1 \Rightarrow$ предполагаме, че кристалът е немагнитен.

Счита се, че оптичката анизотропия на немагнитните кристали е следствие на анизотропията на тяхната относителна диелектрична проницаемост.

При преминаване на светлината през всички прозрачни кристали, с изключение на принадлежащите към кубическата сингония се наблюдава явлението **двойнолъчепречупване - светлинен лъч, паднал върху повърхността на кристала се разделя вътре в кристала на два пречупени лъча, които в общия случай се разпространяват с различни скорости, в различни направления и са поляризиращи в две взаимно перпендикулярни направление.**

За пръв път това явление се наблюдава през втората половина на XVII век от Еразъм Бартоломинус в исландски шпат (CaCO_3).



Оптическа ос на кристала се нарича направлението, в което не се наблюдава двойнолъчепречупване, т.е. падналия лъч, вътре в кристала не се разделя на два лъча.

ВАЖНО! Оптическата ос не е една права (подобно на остта на симетрия на кристала). Тя характеризира дадено направление в кристала и може да се прекара през всяка точка от него, успоредно на това направление.

В зависимост от типа на симетрия, оптически анизотропните кристали са:

- едноосни – с една оптическа ос – кварц, турмалин;
- двуосни – с две оптически оси – гипс, слюда, топаз, ромбическа сяра.

Главна равнина или главно сечение на кристала е всяка равнина, минаваща през оптичната ос. За даден светлинен лъч това е равнината, минаваща през този лъч и оптичната ос.

Разглеждаме едноосни кристали. При двойнолъчепречупване лъчът се разделя на два:

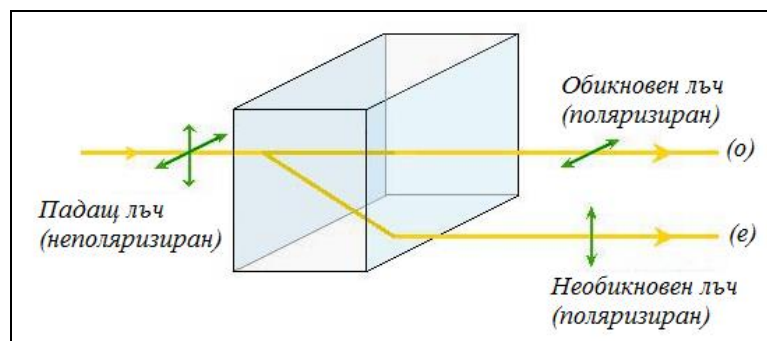
- **обикновен лъч** (o) – подчинява се на обикновения закон за пречупване на светлината на Снелиус и лежи в равнината на падане.

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \text{const} (= \frac{n_2}{n_1})$$

- **необикновен лъч** (e) – не лежи в равнината на падане и не се подчинява на закона на Снелиус

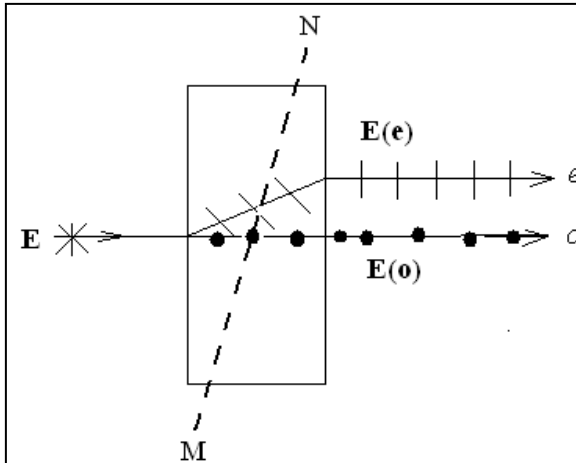
$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} \neq \text{const} = f(i_1), i_1 - \text{ъгъл на падане}$$

Даже при нормално падане ($i_1=0$), той се пречупва.



В двусните кристали двата пречупени лъча са необикновени и показателите им на пречупване зависят от направлението в кристала.

В едноосните кристали двата лъча (o) и (e) са поляризирани във взаимно перпендикулярни направления:



(o) Трептенията на \vec{E}_o са \perp на главната равнина. На фигурата са означени с (·).

(e) Трептенията на \vec{E}_e лежат в главната равнина. На фигурата са означени с |.

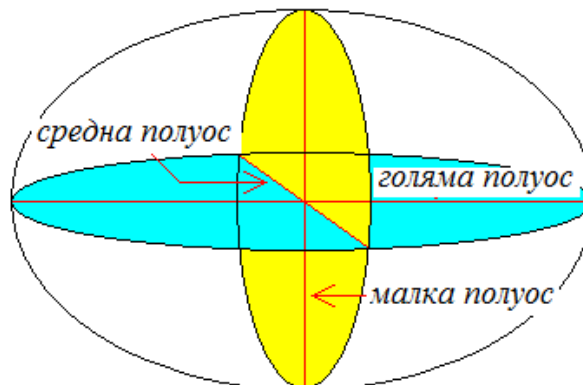
Предполагаме, че на фигурата двата лъча (o) и (e) и оптичната ос MN лежат в равнината на чертежа, т.е. това е главната равнина за лъчите (o) и (e).

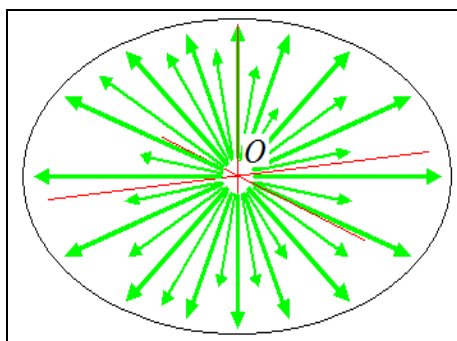
След излизане от кристала двата лъча (o) и (e) са успоредни и се различават само по равнината на трептене, т.е. по нищо друго не се различават. Затова названието необикновен лъч има смисъл само вътре в кристала.

2. Намиране на обикновения и необикновения лъч

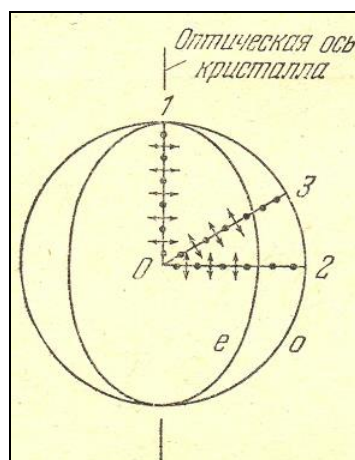
Двойното лъчепречупване се обяснява с анизотропията на кристала. Диелектричната проницаемост и показателят на пречупване зависят от посоката на разпространение на лъчите $n_{ij} = \sqrt{\epsilon_{ij}}$. За едноосните кристали оптичната индикатриса е елипсоид, чиито оси съвпадат с главните оси на диелектричната проницаемост и се записва с уравнението:

$$\frac{x_1^2}{\epsilon_{\perp}} + \frac{x_2^2}{\epsilon_{\perp}} + \frac{x_3^2}{\epsilon_{\parallel}} = 1 \quad \text{или} \quad \frac{x_1^2}{n_o^2} + \frac{x_2^2}{n_o^2} + \frac{x_3^2}{n_e^2} = 1$$





Ако предположим, че в т.О има източник на светлина във всички направления ще се разпространяват две вълни (о) и (е). Начертаваме от т.О във всички направления отсечки, пропорционални на фазовите скорости на (о) и (е). Краищата им ще образуват лъчеви повърхности (или вълнови повърхности).



За (о) - сфера

За (е) - ротационен елипсоид

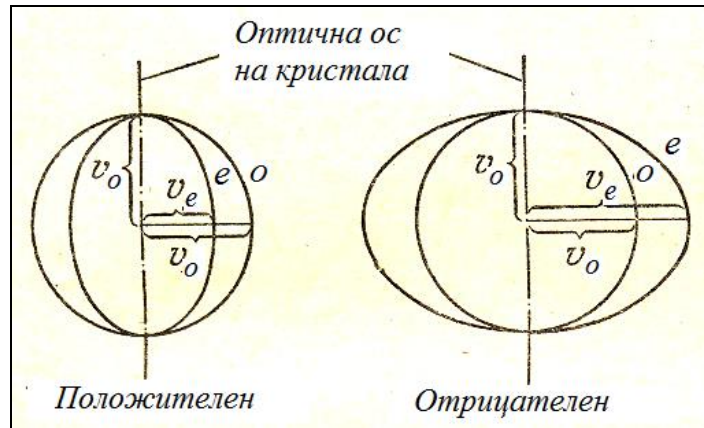
За (о) - $\vec{E}_o \perp$ оптичната ос; $v_o = c/n_o = const$

За (е) - \vec{E}_e сключва различен ъгъл с оптичната ос $\alpha = (0 \div \pi/2)$;

$$v_e = c/n_e$$

Построяваме едно главно сечение на двете вълнови повърхности.

За лъч 2, едноосните кристали се характеризират с показател на пречупване на обикновения лъч $n_o = c/v_o$ и показател на пречупване на необикновения лъч, перпендикулярен към оптичната ос $n_e = c/v_e$.



В зависимост от съотношенията на скоростите v_o и v_e се различават едноосни кристали:

- оптически положителни – елипсоидът е вписан в сферата:

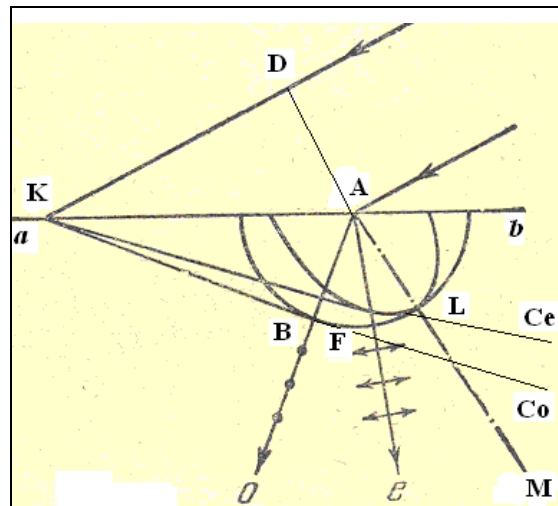
$$v_e < v_o \Rightarrow n_e > n_o - \text{кварц}$$

- оптически отрицателни – елипсоидът е описан около сферата

$$v_e > v_o \Rightarrow n_e < n_o - \text{исландски шпат, турмалин}$$

3. Теория на Хюйгенс

Знаейки вида на вълновите повърхности, може с помощта на принципа на Хюйгенс да определим посоката на (o) и (e).



Нека върху плоската повърхност ab на едноосен, оптически положителен кристал пада под ъгъл i неполяризирана светлинна вълна. Оптичната ос AM е прекарана през т. A и сключва ъгъл γ с равнината ab . AM лежи в равнината на чертежа.

В момент t , вълновият фронт AD на падащата вълна достига т. A от повърхността на кристала и тя става източник на две линейно

поляризирани елементарни вторични вълни - (o) и (e). За време Δt падащата вълна изменява разстоянието DK.

В момента $(t+\Delta t)$:

(o) вълната разпространяваща се от т.А достига точките на сфера с радиус $v_o\Delta t$ и център в т.А

(e) вълната разпространяваща се от т.А като необикновена елементарна вълна достига до точките от повърхността на елипсоид, допиращ се до сферата в т. L, през която минава оптичната ос.

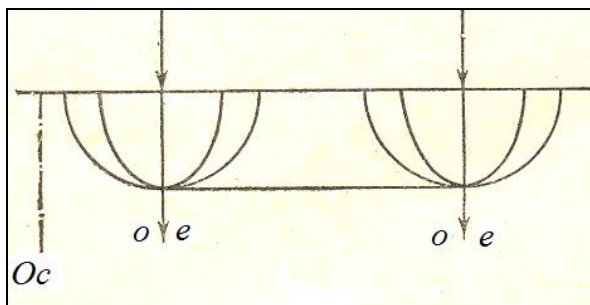
Фронтовете на (o) и (e) вълните, разпространяващи се в кристала в момента $(t+\Delta t)$: са равни KCo и KCe \perp равнината на чертежа.

Направленията на (o) и (e) вълните са АВ и АF.

$$AB \perp KCo, AF \perp KCe$$

(o) и (e) вълните са взаимно перпендикулярни линейно поляризирани.

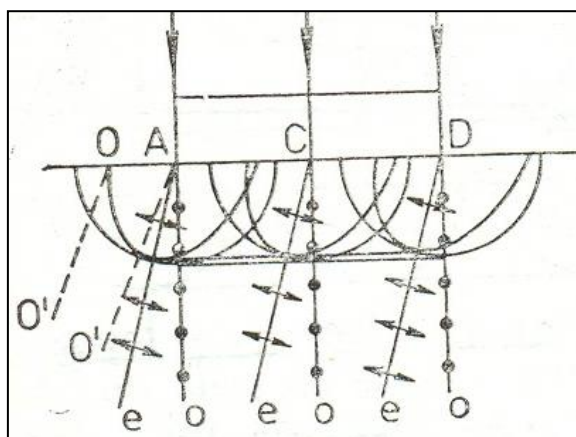
Нека светлината пада нормално на повърхността на кристала.



а) Вълната се разпространява по направление на оптичната ос:
(o) и (e) лъчите не се разделят, не се различават.

$$\vec{k}_o \parallel \vec{k}_e, v_o = v_e$$

Няма двойнолъчепречупване.

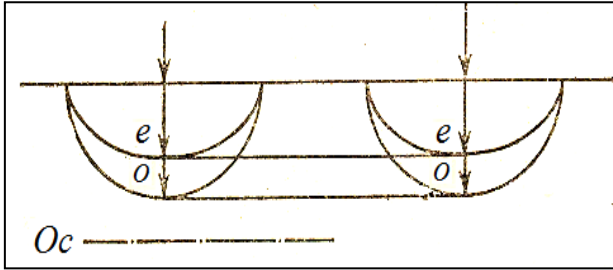


б) Оптичната ос OO' сключва ъгъл с повърхността на кристала.

(o) и (e) лъчите се разпространяват в различни посоки, с различни скорости.

$$\vec{k}_o \neq \vec{k}_e, v_o \neq v_e$$

Има двойнолъчепречупване.



с) Оптичната ос OO' е успоредна на повърхността на кристала.

(o) и (e) лъчите се разпространяват в едно направление, но с различни скорости, вследствие на което между тях възниква все по-нарастваща разлика във фазите.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d(n_e - n_o) ; n = c/v$$

$$\vec{k}_o \parallel \vec{k}_e , v_o \neq v_e$$

Има двойнолъчечепречупване.

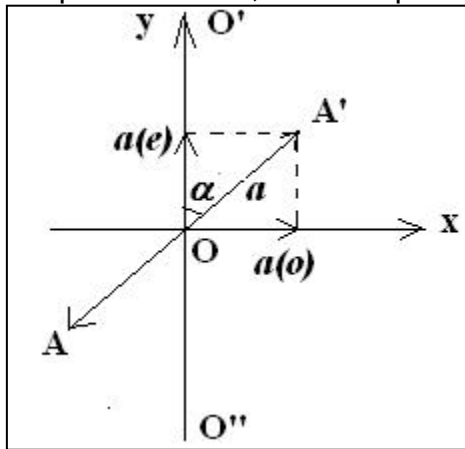
4. Интензивност на (o) и (e) лъчите

Направлението на поляризацията на (o) и (e) лъчите не зависи от това дали падащата светлина е естествена или линейно поляризирана. Само ще бъде различна тяхната интензивност.

- При естествена светлина падаща върху кристала: $I_o = I_e$.

- При линейно поляризирана - I ще зависи от ъгъл α .

Нека върху кристала пада линейно поляризирана светлина в направление Oz , като направлението на трептене на падащия лъч е AA'



$O'O'' \equiv Oy$ – оптична ос на кристала

ZY - главна равнина

$\vec{k} \equiv Oz$ – направление на падащия лъч.

α - ъгъл между направлението на трептене на падащия лъч на главната равнина

Ако a е амплитудата на падащия лъч, то амплитудата на двете вълни, излизащи от кристала е:

$$a_o = a \sin \alpha - \text{за } (o) , a_o \perp ZY$$

$$a_e = a \cos \alpha - \text{за } (e) , a_e \text{ лежи в } ZY$$

Техните интензитети са:

$$I_o = I \sin^2 \alpha$$

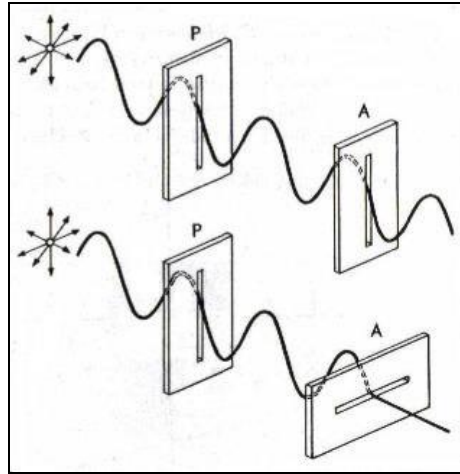
$$I_e = I \cos^2 \alpha$$

, I – интензитет на падащата светлина

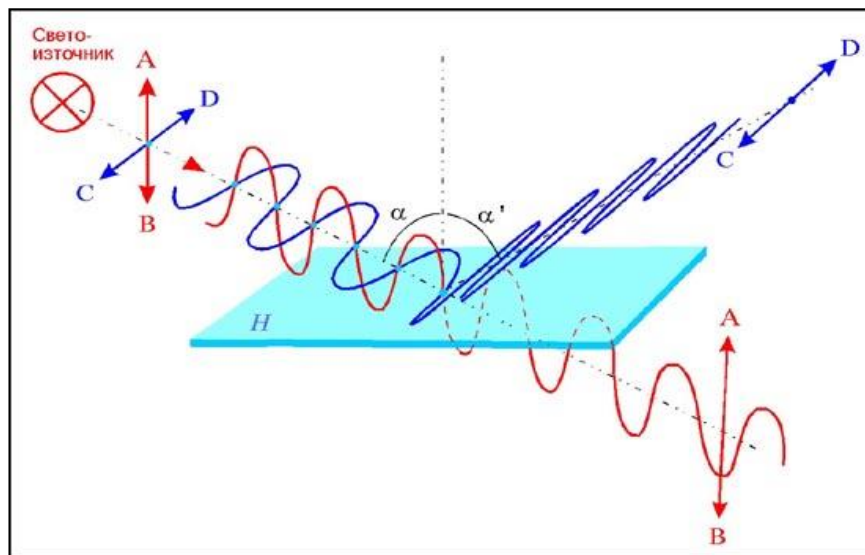
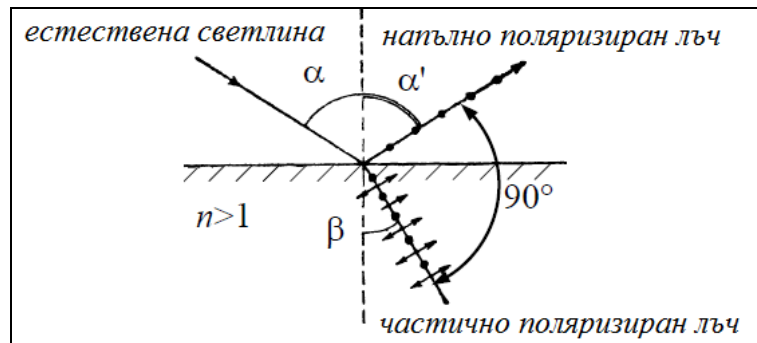
$$\frac{I_o}{I_e} = \tan^2 \alpha$$

5. Поляризационни прибори

Механичен модел на поляризация на светлината



а) Поляризация при отражение на вълните, падащи под ъгъл на Брюстер θ (когато $\alpha + \beta = 90^\circ$): $\text{tg } \theta = n_2 / n_1$



б) Дихроизъм

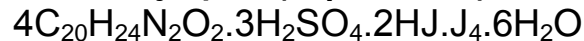
Силно се поглъща единият от лъчите (o) или (e) в кристала.

Турмалин (turamali – разноцветен)



- Скъпоценен минерал с тригонална симетрия;
- Включва 26 микроелементи - калий, калций, магнезий, манган, желязо, силиций, йод, флуор и др.;
- Кристален магнит – има постоянен електричен заряд.
- За видимите лъчи, лъчът (o) практически напълно се поглъща на дължина 1мм, за лъч (e) коефициентът на поглъщане зависи от дължината на вълната.

Кристал йоднохитинов сулфат (Херапатит)

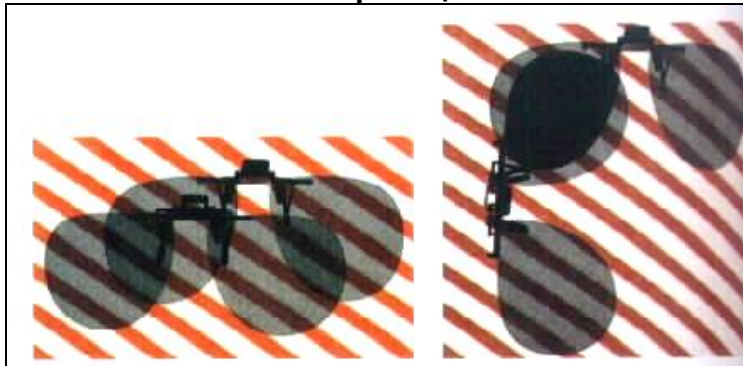


Единият от лъчите се поглъща на дължина 0,1мм. Затова се използва за направа на поляризационни устройства, наречени поляроиди.

Размерите на кристала са малки затова се прави целулоидна плака, в която е вкарано голямо количество еднакво ориентирани кристали на йоднохитинов сулфат.

Преминавайки през поляроида естествената светлина се превръща в линейно поляризирана, а интензитетът и намалява два пъти.

Очила с поляризационни стъкла



Cutnell, Johnson: Essentials of Physics

ФОТОГРАФИЯ



в) Двойнолъчепречупване – разделянето на (o) и (e) зависи от дебелината на кристала. Използват се сложни системи за това разделяне.

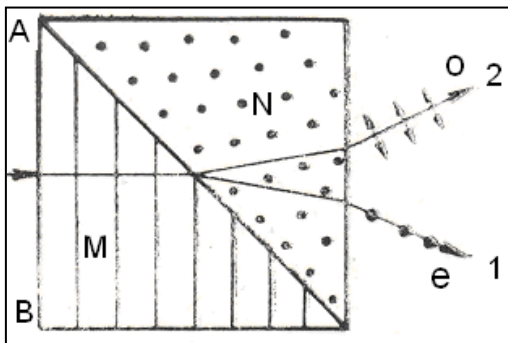
Най - често използваният материал е исландски шпат - CaCO_3 . Кристалната му структура е тригонална.



1) призма на Воластон

Две правоъгълни призми М и N от исландски шпат (CaCO_3) залепени по хипотенузата.

Оптичните им оси са взаимно перпендикулярни: $OO' \perp O_1O_1'$
Естественият лъч пада перпендикулярно на стената АВ.



\vec{k} [за (o), (e)] $\perp OO'$ (призма М)

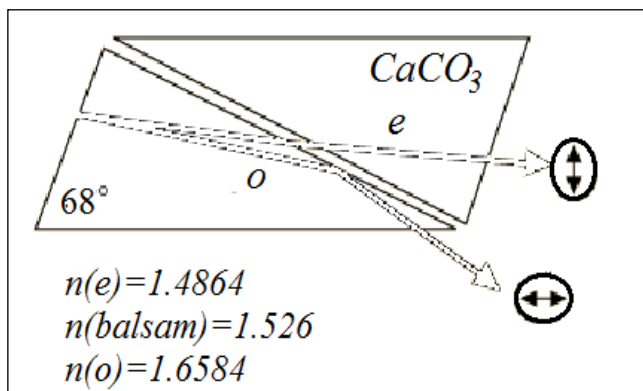
В призма М : Лъчите (o) и (e) се разпространяват в едно направление перпендикулярно на оста с различни скорости: v_o и v_e .

На границата на двете призми, лъчите се пречупват и се разделят.

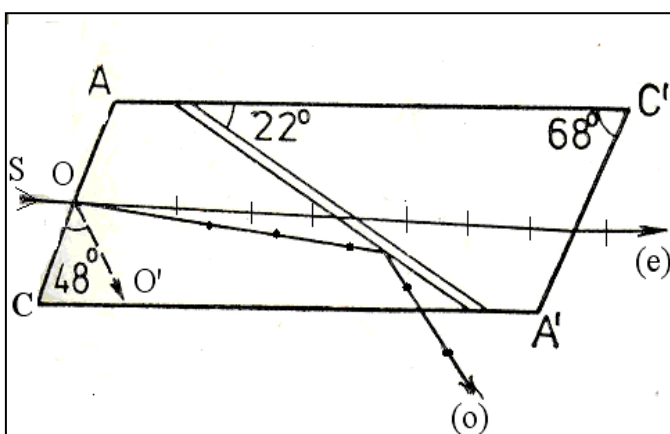
\vec{k} [за (o), (e)] $\perp O_1O_1'$ (призма N)

$\vec{k}(1) \parallel O_1O_1'$; $\vec{k}(2) \perp O_1O_1'$

2) Призма на Никол (никол) 1828г.



- Състои се от правоъгълни призми от исландски шпат.
- Получава се широк сноп поляризирана светлина.
- Използва се само за видимия диапазон, т.к. канадския балсам е непрозрачен за УВ лъчи.



Естественият калцитов кристал се шлифова, така че ъгълът, който сключват стените CA и CA' от 71° , (както е при естествения кристал) да се намали на 68° . След това кристалът се разрязва по диагонала, който е перпендикулярен на CA. Получените разрязани стени се полират и се слепват отново с канадски балсам.

Той е прозрачен за видимата светлина (непрозрачен за УВ) и оптически изотропен с

$$n_{кб}(589\text{nm}) = 1,55$$

Естествена светлина пада върху стената CA (успоредно на CA'). В призмата ACA' лъчът се разделя на (o) и (e), като $n_o = 1,658$ и $n_e = 1,515$.

$$n_e < n_{кб} < n_o$$

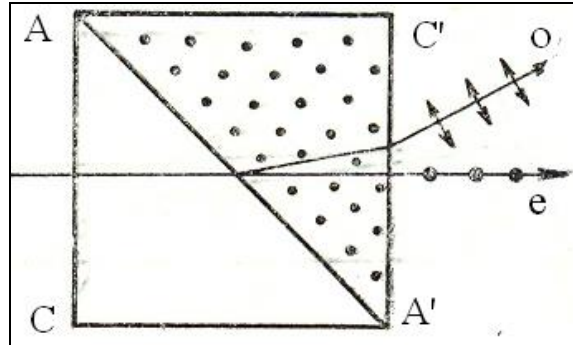
Лъчът (o) претърпява пълно вътрешно отражение на границата с к.б., т.к. $n_o > n_{кб}$ и ъгълът на падане $i_1 = 76.5^\circ > i_{\text{граничен}}$

Лъчът (o) се поглъща от почернената стена CA'.

Лъчът (e) свободно минава през канадския балсам и след пречупване на границата на C'A' излиза успоредно на падащия лъч S.

Извод: Николът преобразува естествената или частично поляризираната светлина в линейно поляризирана, чиято равнина на трептене съвпада с главната равнина на призмата, минаваща през лъча и оптичната ос OO'. При завъртане на призмата около лъча S на някакъв ъгъл, на такъв ъгъл се завърта и равнината на трептене на светлината, преминаваща през призмата.

3) Поляризационна призма



Поради пречупване от наклонените граници СА и С'А' при никола, падащият и излизащия лъч са леко отместени.

Това се отстранява в поляризационната призма от исландски шпат, където стените са перпендикулярни.

Оптичестата ос е \parallel СА.