

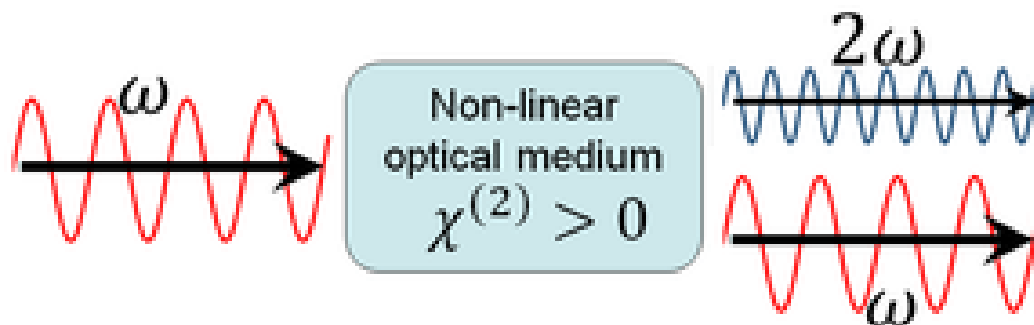
## Generalități cu privire la generarea pulsurilor laser de ordinul tera și peta-watt

Abrevieri:

CPA	Chirped pulse amplification
CW	Continuous wave
HHG	High-order harmonic generation
SHG	Second-order harmonic generation
KLM	Kerr-mode-locked
OPA	Optical parametric amplification/amplifier
OPCPA	Optical parametric chirped pulse amplification/amplifier
UV	Ultraviolet (~380–200 nm)
VUV	Vacuum ultraviolet (~200–100 nm)
XUV	Extreme ultraviolet (~100–10 nm)

- Laserii convenționali rareori ajung în UV, dar
- Procesele de conversie a frecvențelor trebuie să ajungă în VUV – coerență
- Chiar dacă procesele de mixare a undelor optice nonlineare perturbative, în unele materiale sau în gaze, accesează VUV și IR mediu, procesele HHG deschid calea către XUV și chiar mai sus, permițând generarea pulsurilor cu durată attosecunde.

SHG

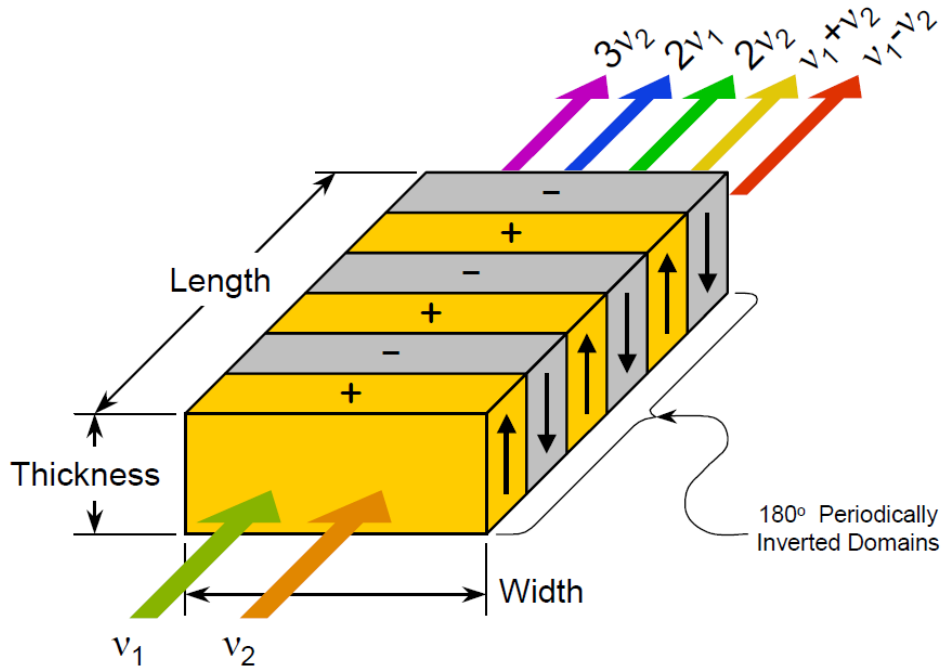


Generarea armonice de ordinul 2 (secundare) este un proces optic nelinear în care 2 fotoni cu aceeași frecvență  $\omega$  ce interacționează cu un material nelinear, sunt combinați și în loc se generează un nou foton cu energia dublă față de fotonii inițiali ( $2\omega$  sau  $\lambda/2$ ) ce conservă coerența excitației. Procesul se mai numește generare de frecvență-sumă sau generare de armonici de ordinul 2 sau, în general, generare armonică.

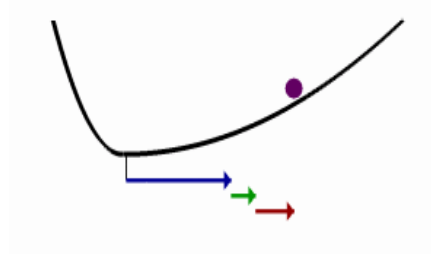
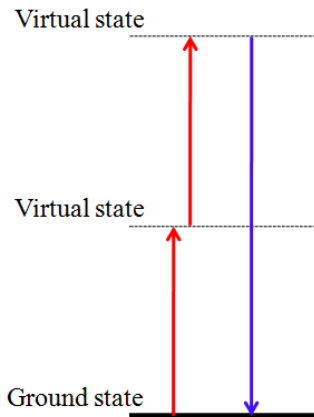
În unele cazuri, aproape 100% din energia luminii poate fi convertită în frecvența armonice secundare. Aceste cazuri implică fascicule laser pulsate intense ce trec prin cristale mari și aliniat cu grijă pentru a realiza potrivirea de fază.

Referitor la potrivirea de fază, generarea armonice 2 se întâmplă în trei tipuri de potrivire critică de fază, notate cu 0, I și II. În SHG de tip 0, doi fotoni având polarizare extraordinară relativă la cristal se vor combina pentru a forma un singur foton cu frecvență/energie dublă și polarizare extraordinară. În SHG de tip I, doi fotoni având polarizare ordinară relativă la cristal se vor combina pentru a forma un singur foton cu frecvență dublă și polarizare extraordinară. În SHG de tip II, doi fotoni având polarizări ortogonale se vor combina pentru a forma un singur foton cu frecvență dublă și polarizare ordinară. În general, pentru a utiliza tipul 0 de potrivire de fază se folosește un tip de material denumit cristal cu potrivire de quasi-fază (QPM), de exemplu niobat de litiu cu poli periodici (PPLN) sau tantalat de litiu cu

poli periodici (PPLT). Acești poli sunt o formațiune de straturi succesive ce alternează ca orientare într-un material birefringent.



În alte cazuri doar o fracție mică din energia luminoasă este convertită în armonică secundară, ce poate fi detectată doar cu ajutorul filtrelor optice – fără utilitate în cazul laserilor de mare putere.



Schema nivelelor energetice în procesul SHG

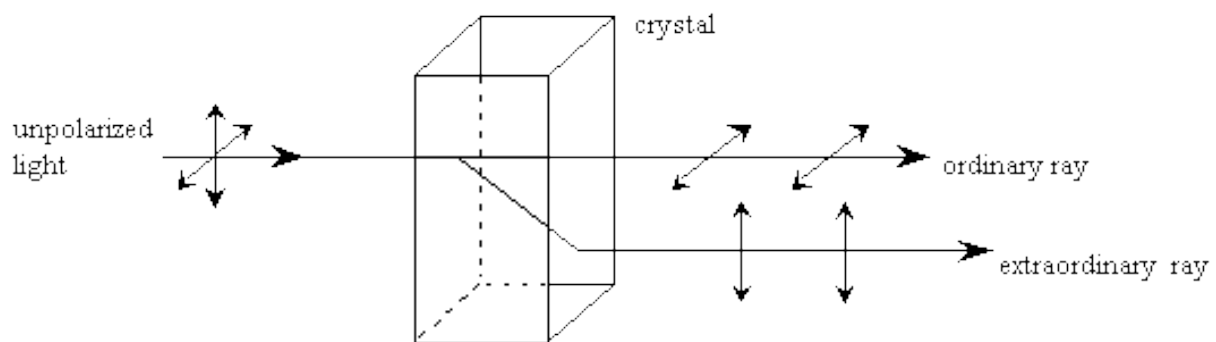
Un electron este împins dintr-o parte într-alta de o forță oscilantă sinusoidală, de ex. de câmpul electric generat de lumină. Deoarece electronul este într-un mediu cu energie potențială anarmonică, mișcarea electronului nu este sinusoidală. Cele 3 săgeți reprezintă seria Fourier a mișcării:

A – Susceptibilitatea lineară; V – Generarea armoniciei secundare; R – Rectificarea optică

Rectificarea optică este un proces optic nelinear ce constă în generarea unei polarizări quasi-DC într-un mediu nelinear la trecerea unui fascicol optic intens. Dacă o rectificare electrică (diodă) transformă un câmp electric sinusoidal într-un curent DC, o rectificare optică transformă un câmp

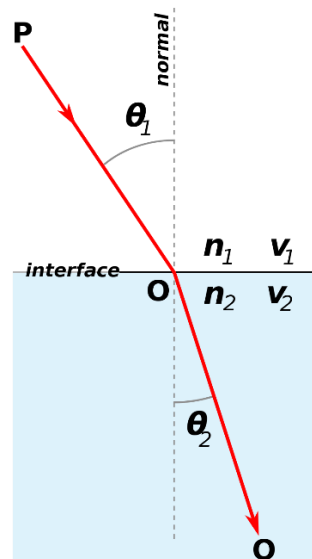
electric într-o polarizare DC, dar nu și un curent DC. Poate apărea și un curent DC doar dacă lumina variază ca intensitate.

Seria Fourier este o funcție periodică compusă din sinusoide înrudite armonic și combinate prin însumări ponderate.



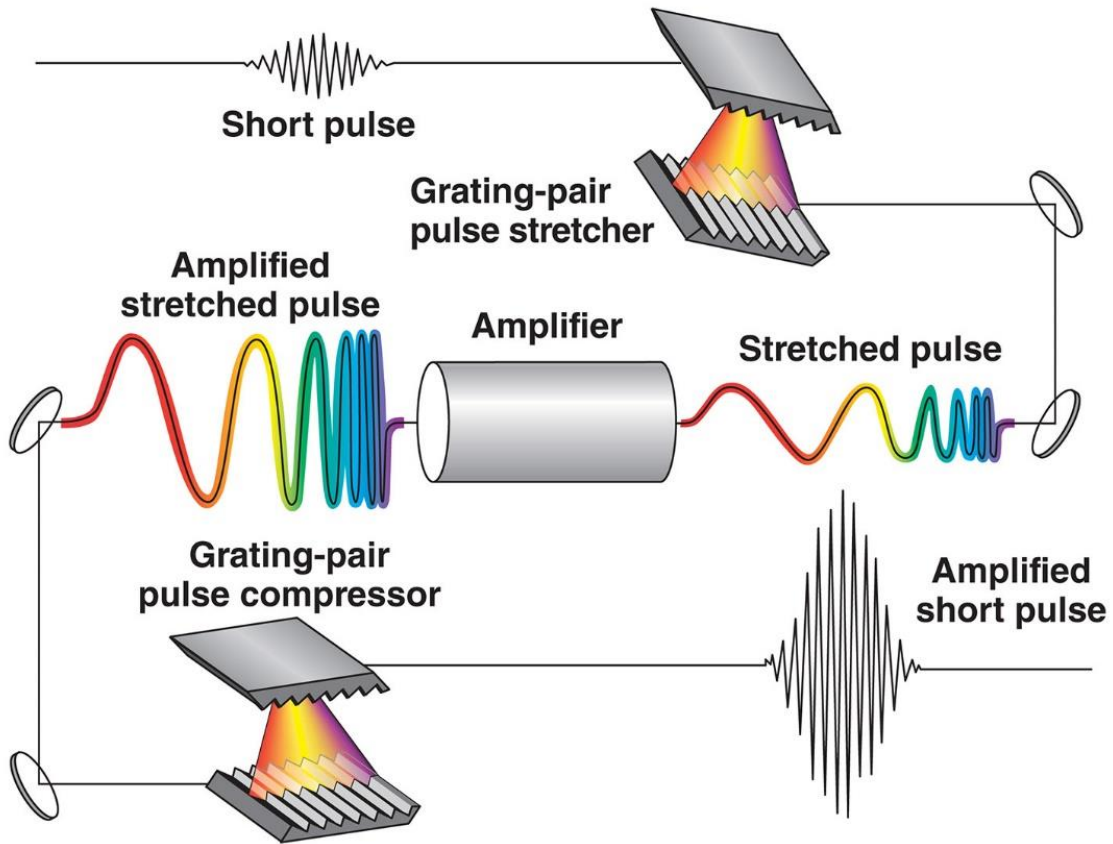
1. Rază Ordinară – satisface legea lui Snell (sau legea refracției, adică  $n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$ )
2. Rază Extraordinară – nu se supune legii lui Snell

$$\sin \theta_2 / \sin \theta_1 = n_1 / n_2 = v_2 / v_1 = (\lambda_2 / \lambda_1 \rightarrow \text{undă monocromatică})$$

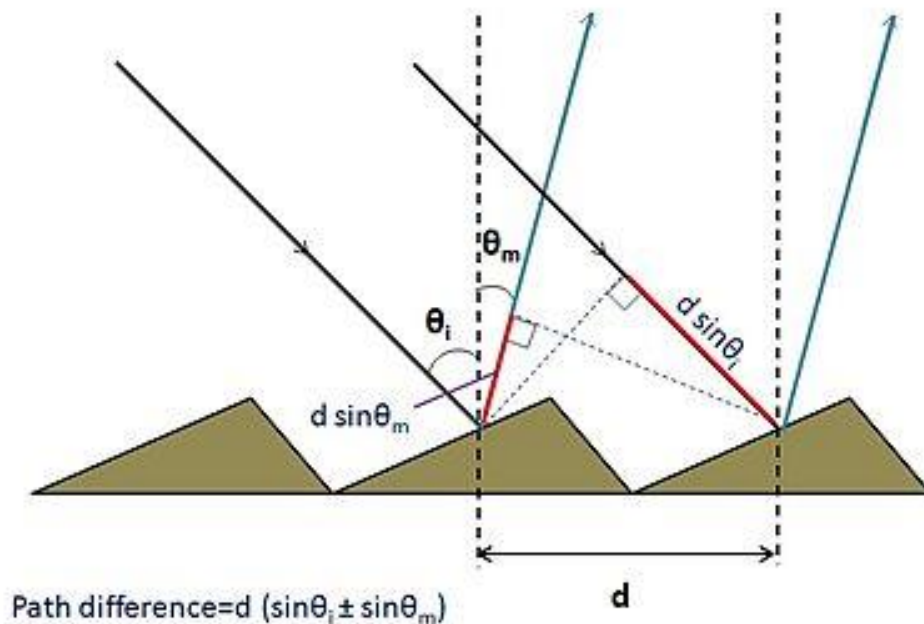


Calculul propagării undelor extraordinare este dificilă; se face utilizând ecuațiile lui Maxwell, condițiile de potrivire de fază prin transformarea la un sistem de coordonate non-ortogonal și principiul lui Huygens, care spune ca orice punct din frontul de undă este el însuși o sursă de “mici unde” care emise din diverse puncte interferă mutual unele cu altele. Aceste “mici unde” pleacă ca amplitudine de la zero, cresc și apoi revin înapoi la zero.

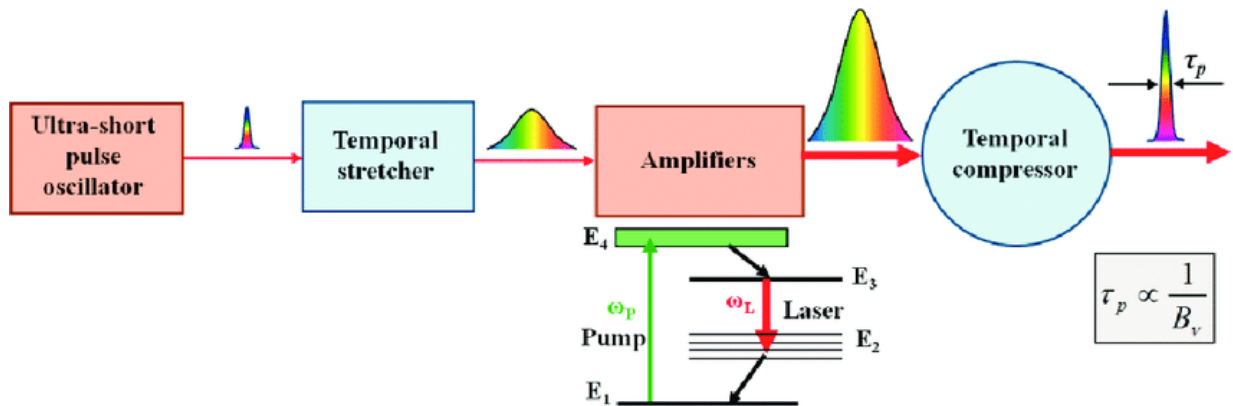
CPA, generic, este o tehnologie de amplificare a pulsurilor laser scurte până la nivele de tera sau petawatt, în care pulsul laser este întins temporal și spectral, apoi amplificat și pe urmă comprimat din nou. Întinderea și compresia pulsului folosește “grilaje de difracție” reflectorizante ce determină ca diversele componente spectrale ale pulsului să parcurgă distanțe diferite.



Prima pereche de grilaje de difracție reflectorizante dispersează spectrul și întinde temporal pulsul cu un factor de 1000.



## CPA



$\tau_p$  = durata pulsului compresat temporal

$B_v$  = lățimea de bandă a frecvenței pulsului amplificat

- Pentru a evita distrugerea pulsului și apariția efectelor non-lineare în timpul amplificării, pulsul inițial (obținut în principiu de la un oscilator Kerr-mode-locked) este întins de la fs la sute de ps, amplificat și apoi recompresat aproape la nivelul duratei inițiale.
- Pulsul inițial ultra-scurt este întins în așa fel încât să se potrivească aproximativ cu durata pulsului de pompare, apoi este amplificat de către mixarea non-lineară cu pulsul intens de pompare sincronizat (cu durată de  $\sim$  fs). În final pulsul este recompresat aproape de durata inițială.

## OPCPA

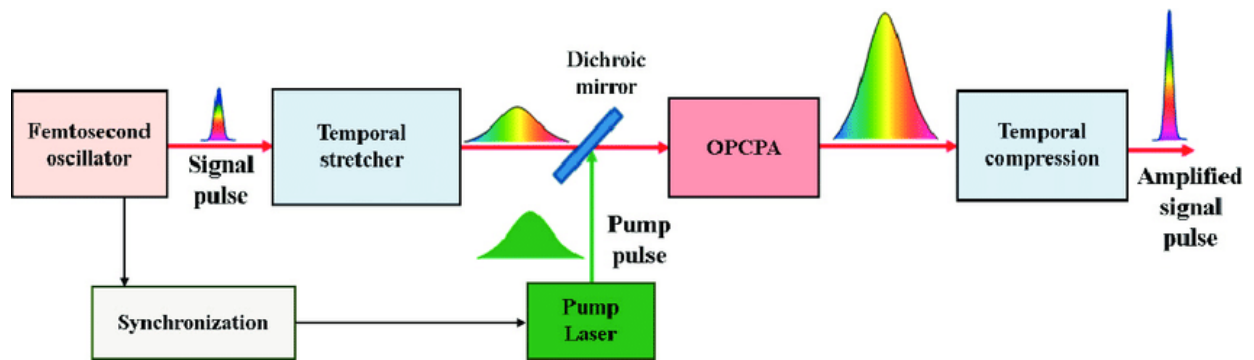
Comparativ cu CPA, care se bazează pe un mediu de amplificare laser, OPCPA are un număr de avantaje importante:

- Amplificarea parametrică într-un singur pas printr-un cristal nelinear poate fi de zeci de decibeli, deci stagiile de amplificare se reduc (cel mai des este unul singur). Se evită astfel geometriile multipas complicate, setup-ul fiind unul simplu și compact.
- Amplificarea parametrică este posibilă pe un spectru larg de frecvențe. O lățime de bandă de amplificare ultralargă se poate obține însă doar în anumite condiții de potrivire de fază.
- În condiții optime de potrivire de fază, lățimea de bandă de amplificare poate fi foarte mare, permițând astfel generarea de pulsuri cu energie înaltă și foarte scurte (câteva fs).
- Efectele termice în cristalele amplificatoare, cum este cel de lentilă termică, sunt mult mai slabe decât în amplificarea laser, deoarece aici apare doar o mică încălzire datorată absorbției parazite. Acest lucru împreună cu eficiența cuantică foarte înaltă permite scalarea la energii și vârfuri de putere foarte înalte, fără diminuarea calității foarte bune a fascicolului din pulsurile amplificate.
- Deoarece amplificarea parametrică ia naștere doar pe durata pulsului de pompare, se evită problemele de pierdere de putere prin emisia spontană amplificată din amplificatorii laser cu putere mare ce pot genera pulsuri de energie înaltă și cu înalt contrast al intensității, ce apar înaintea pulsului principal.

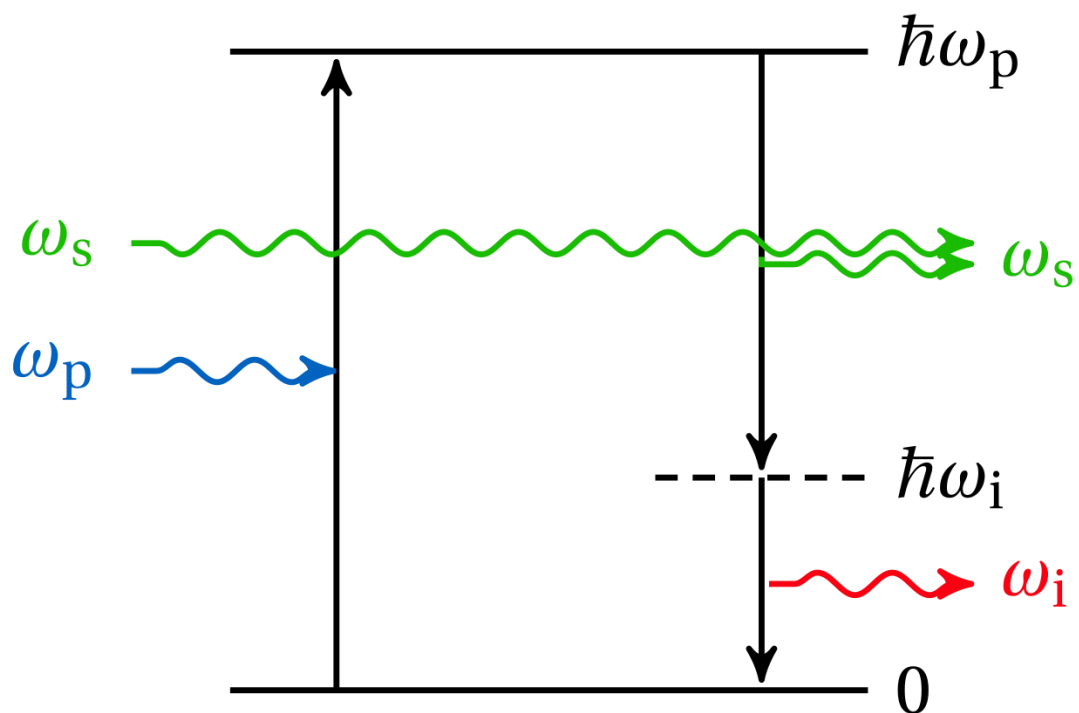
Ca și dezavantaje ale OPCPA:

- Necesitatea potrivirii duratelor pulsurilor pomparei și semnalului, și sincronizării laserului de pompare cu cel principal.
- Cerințe înalte pentru calitatea fascicolului de pompare.

3. Diafragma (deschiderea prin care trece lumina) limitată a celor mai multe cristale nelinare existente.
4. Complicații în ce privește potrivirea de fază.



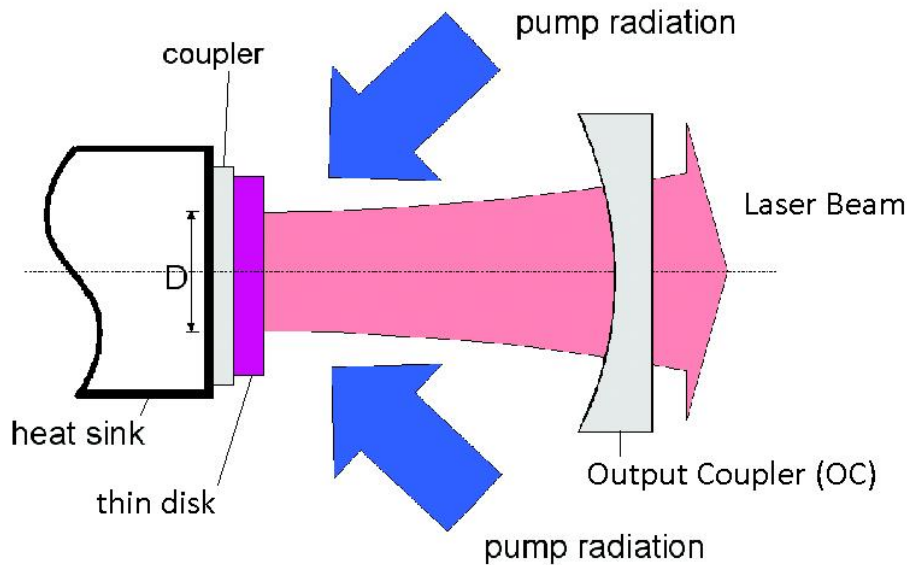
Principiul OPA



Un foton de pompare excită un nivel energetic virtual a cărui dezexcitare este stimulată de către un foton de semnal rezultând astfel emisia celui de-al doilea foton de semnal identic cu primul, plus un foton inutil apărut din conversia energiei și impulsului.

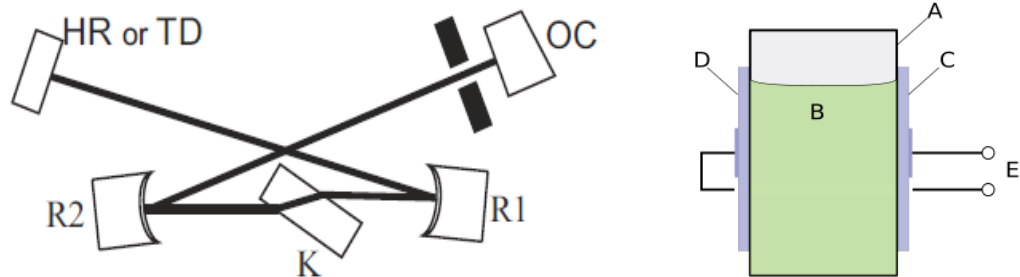
Oscilatorul KLM (Kerr-mode-locked) se compune din două părți:

1. Discul subțire (TD) - Ti:sapphire



- Grosimi de 150 - 260  $\mu\text{m}$  cu  $\phi = 12.0 \text{ mm}$
- Coeficient de absorbție de  $5.0 - 3.9 \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$  pentru  $\lambda_{\text{pompa}} = 532 \text{ nm}$
- Discul subțire (TD) este depus pe spate cu un strat înalt reflectorizant (HR) și pe față cu un strat anti-reflexie (AR) atât pentru lungimea de undă de pompaj cât și pentru lungimea de undă laser propriu-zisă
- Durată  $\sim 17 \text{ fs}$
- Energie  $\sim 10^{-6} \text{ J}$ , suficientă pentru a elimina stagiile de preamplificare  $\Rightarrow$  simplifică sistemul

2. Cavitatea KLM (Kerr-mode-locking)

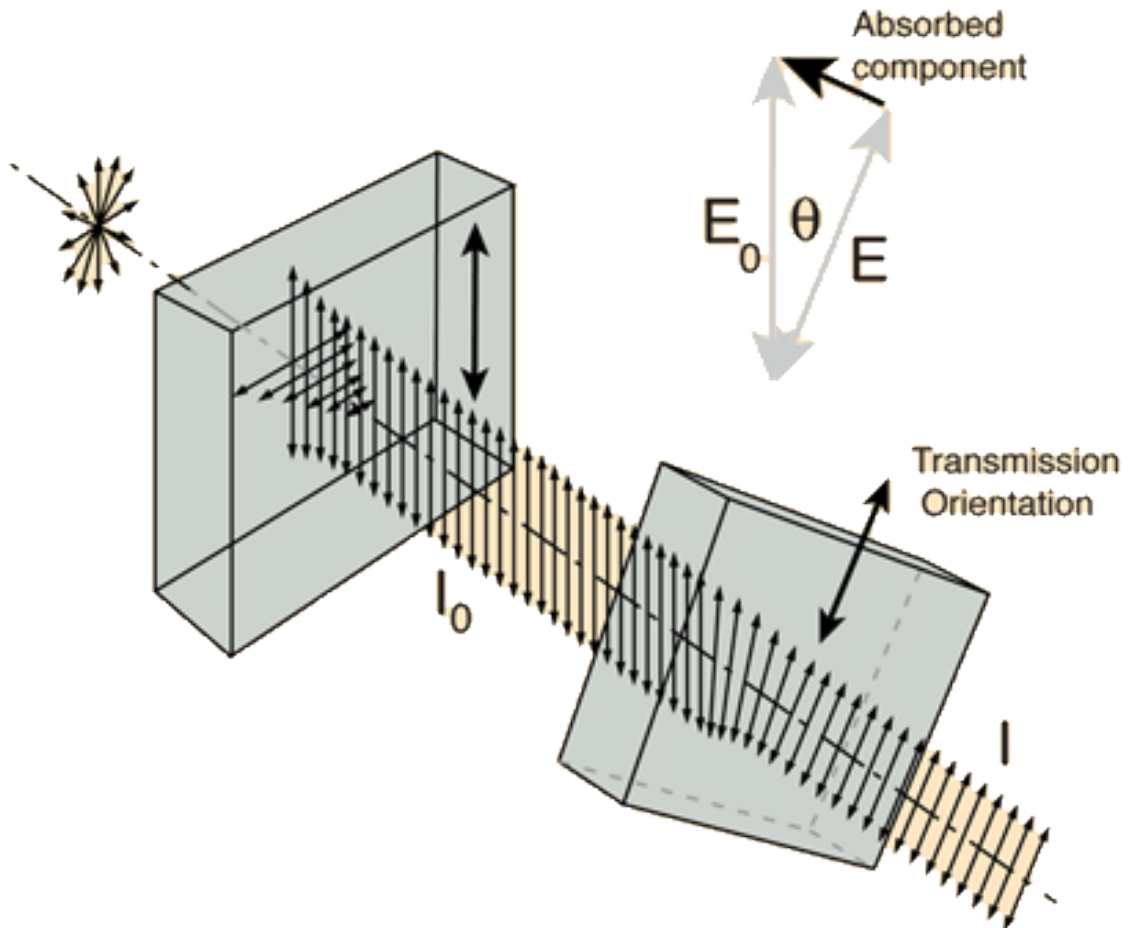


- Celula Kerr servește ca mediu de amplificare. Poate fi un container (A) cu nitrobenzen (B) căruia i se aplică o tensiune înaltă (E) pe electrozii (C) și (D). Efectul Kerr  $\rightarrow$  modificarea indicelui de refracție indus este direct proporțională cu pătratul câmpului electric aplicat.
- $\Delta n = \lambda K E^2$
- Efectul Kerr optic (AC Kerr)  $\rightarrow$  câmpul electric aplicat este generat chiar de lumina însăși și apare doar la intensități foarte mari ale luminii.
- Densitatea puterii de pompaj trebuie să fie menținută constantă prin mărirea suprafeței modului pe disc și, proporțional, cu creșterea puterii de pompaj, mai ales că discul este prea subțire ca să realizeze auto-focalizare.
- Transmisia T a OC este de doar câteva procente  $\Rightarrow$  puterea stocată în cavitatea oscilatorului este cu un factor de  $\sim 1/T$  mai mare decât puterea de ieșire.

- Dichroism            în splitere de fascicol: splitarea fascicolului de lumină albă în culorile componente.
- cu lumină polarizată: proprietate a materialelor în care lumina cu stări de polarizare diferite are coeficienți de absorbție diferiți.

Lumina ce traversează un mediu dichroic se supune legii lui Malus:

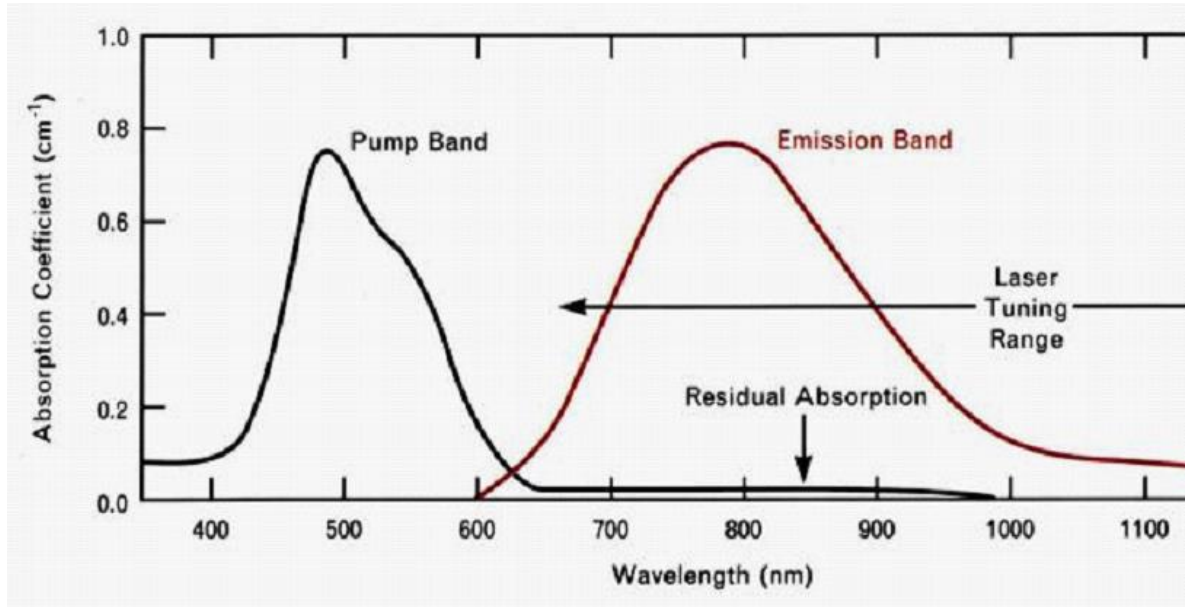
- Legea lui Malus             $E = E_0 \cos \theta$       dar       $I \sim E^2$   
                                        $E$  este amplitudinea semnalului și  $I$  este intensitatea sa  
                                        $E^2 = E_0^2 \cos^2 \theta \Rightarrow I = I_0 \cos^2 \theta$



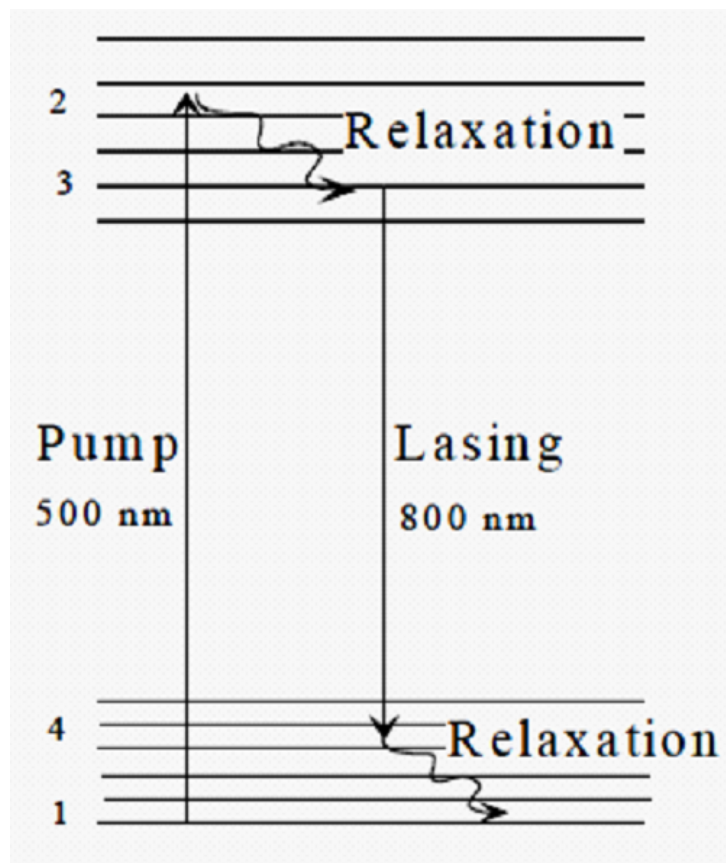


## Cristalul de Ti:sapphire ( $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ )

- Ti:sapphire genereaza printre cele mai scurte pulsuri ( $<100$  fs, 200 nm FWHM) având, prin urmare, cele mai înalte picuri de putere.
- Domeniul spectral este NIR, 670 - 1070 nm, cu picul curbei amplificării la 800 nm.
- Benzile de absorbtie și emisie pentru Ti:sapphire



- Schema de nivele energetice pentru Ti:sapphire este cu 4 nivele



e. Caracteristicile laserilor cu Ti:sapphire

Material	Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> crystal			
Matrix	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Active ions	Ti <sup>3+</sup>			
Wavelengths	650 nm to 1180 nm			
SHG wavelengths	325 nm to 590 nm			
THG wavelengths	252 nm to 267 nm			
Level scheme	4			
Photon energy for 800 nm	2.48 × 10 <sup>-19</sup> J, 1.55 eV			
Lifetime of upper laser level	3.2 μs (at RT)			
Main pumping bands	510–530 nm			
Operation mode	CW	Free-running	Q-switched	Mode-locked
Pump mechanism	Argon laser, SHG Nd lasers, flashlamp, diode laser			
Length of pulse	10 μs		2–100 ns	5 fs-50 ps
Average output power	50 W		1–2 W	1 W
Output pulsed energy	5 J		1 J	10–100 nJ
Repetition rate	1 Hz-100 kHz		1–40 Hz	10–100 MHz
Cooling system	Water, Peltier cooler			