

Prof. Dr Halina Abramczyk
Technical University of Lodz, Faculty of Chemistry
Institute of Applied Radiation Chemistry
Poland, 93-590 Lodz, Wroblewskiego 15
Phone:(+ 48 42) 631-31-88; fax:(+ 48 42) 684 00 43
[E-mail:abramczy@mitr.p.lodz.pl](mailto:abramczy@mitr.p.lodz.pl), <http://mitr.p.lodz.pl/evu>,
<http://mitr.p.lodz.pl/raman>

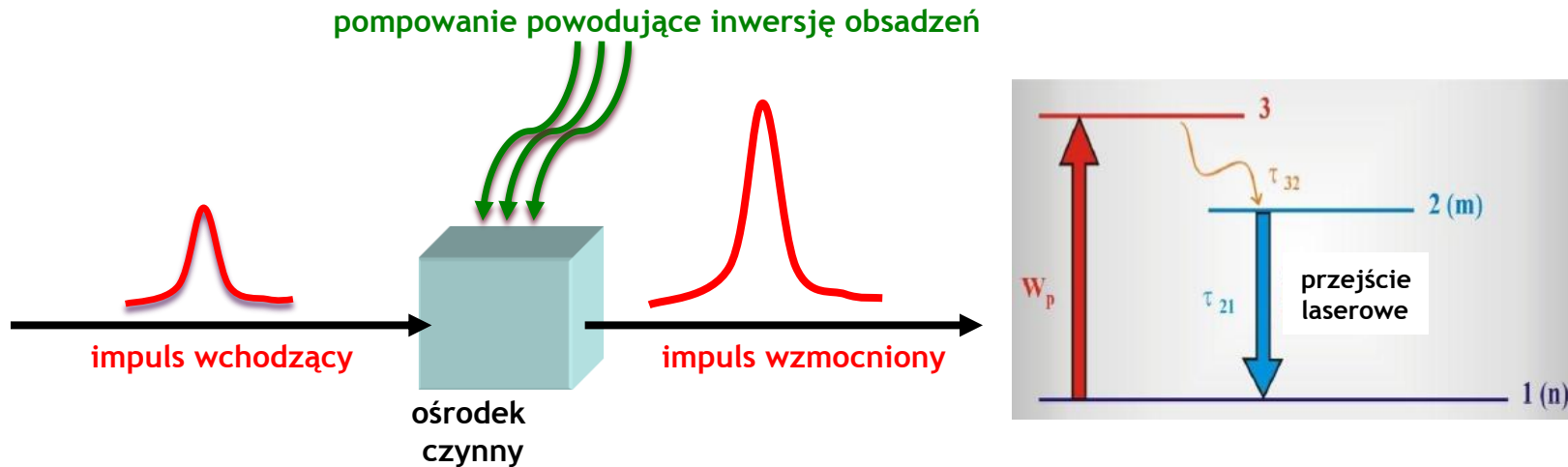
Wzmacniacze

WZMACNIACZE

Energia impulsu z laserów femtosekundowych zwykle nie przekracza kilku nJ dla mocy szczytowej rzędu MW. W wielu zastosowaniach wymagana jest jednak większa energia i moc szczytowa. Naukowcy poszukują więc metod umożliwiających skrócenie czasu trwania impulsów, zwiększenie ich mocy szczytowej i intensywności. Ze względu na ograniczenia dotyczące możliwości skrócenia czasu trwania impulsu, dalszy wzrost mocy szczytowej i intensywności można uzyskać jedynie poprzez zwiększenie energii wyjściowej. Wzmacnianie energii impulsów femtosekundowych może prowadzić do mocy szczytowej rzędu terawatów. Wzmocnienie, połączone z początkowym wydłużeniem impulsu, a następnie kompresją w końcowym etapie może konwertować terawaty w petawaty dla impulsów subpikosekundowych. Jak do tej pory najwyższe energie, moce szczytowe i natężenia promieniowania mogą być osiągnięte dla wzmacniaczy Nd:szkło, a nie dla wzmacniaczy Ti:szafir. Najpotężniejszy laser na świecie (w roku 2003) "Vulcan" w Rutherford Appleton Laboratory, Wielka Brytania dostarczał 2,5 kJ w dwóch wiązках 150 nm, 1 pW, 10^{21} W/cm² a system „Nova” w Lawrence Livermore National Laboratory dostarczał impulsy: 1,3 kJ, 800 ps które można było skompresować do 430 fs osiągając 1,3 pW i 10^{21} W/cm².

WZMACNIACZE

Jeżeli impuls przechodzi przez ośrodek nieliniowy, w którym utrzymywana jest inwersja obsadzeń (przez pompowanie z innego źródła) to impuls przechodzący przez ośrodek wywołuje emisję wymuszoną. W rezultacie wychodzący impuls zostaje wzmocniony.



Wzmocnienie G , które może być osiągnięte oraz energia, która może być otrzymana w wyniku pracy wzmacniacza są najważniejszymi parametrami w projektowaniu wzmacniaczy.

WZMACNIACZE

Można pokazać, że w układzie trójpoziomowym wzmocnienie można opisać równaniem Frantz'a-Nodvik'a

$$G = \frac{E_S}{E_{in}} = \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{E_{in}}{E_S} \right) - 1 \right] G_0 \right\} \quad (1)$$

gdzie:

$$G_0 = \exp(g_0 L)$$

jest wzmocnieniem dla małych sygnałów po jednokrotnym przejściu przez ośrodek wzmacniający.

a

$$E_S = \frac{h\nu}{\gamma\sigma} = \frac{E_{St}}{\gamma g_0}$$

WZMACNIACZE

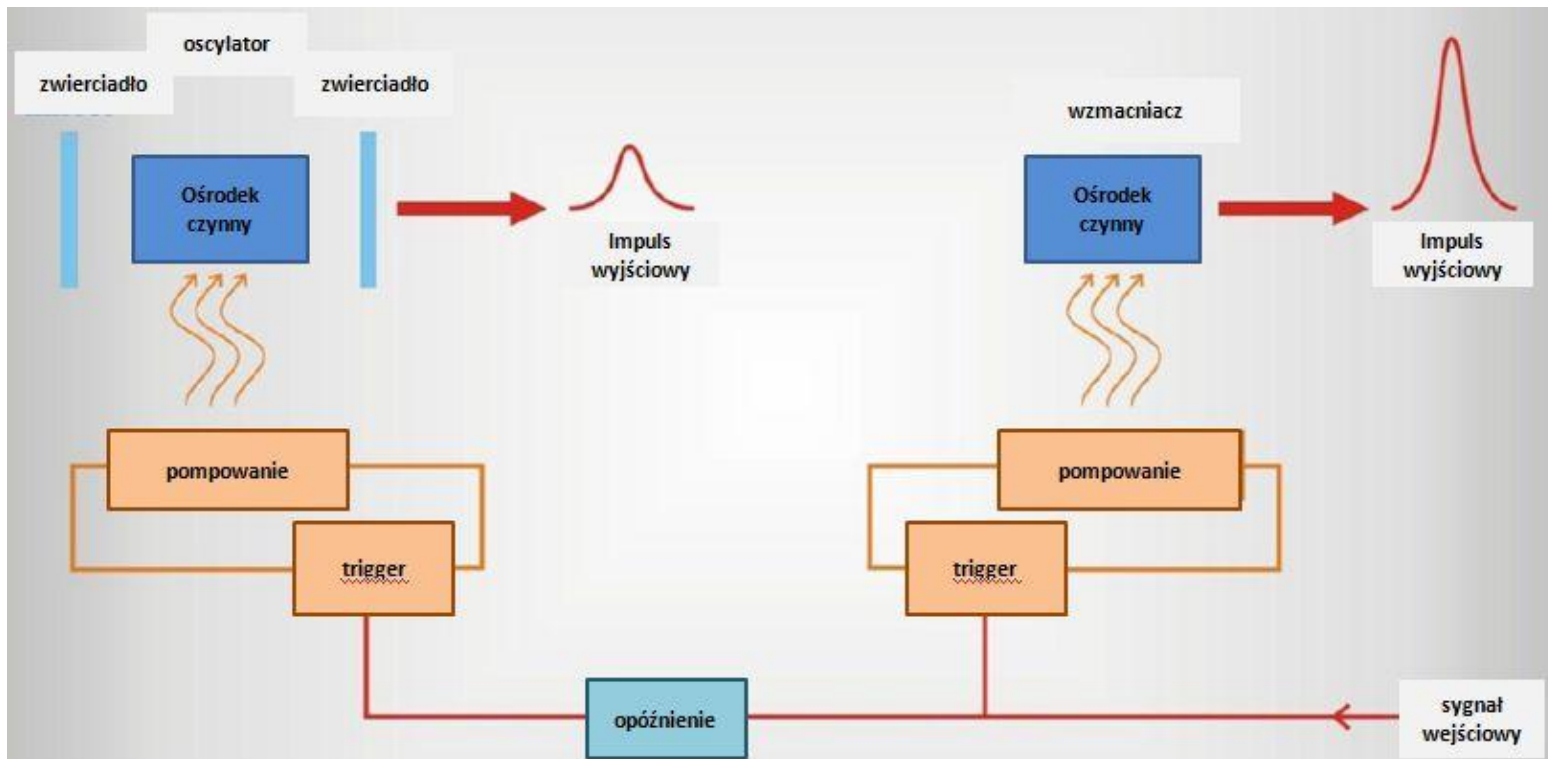
Wyróżnia się cztery podstawowe konfiguracje wzmacniaczy:

- wielostopniowe wzmacniacze mocy,
- wzmacniacze z wielokrotnym przejściem (multipassamplifier-MPA),
- wzmacniacze regeneratywne (RGA),
- wzmacniacze impulsów typu chirped (chirped pulse amplification, (CPA)

WZMACNIACZE

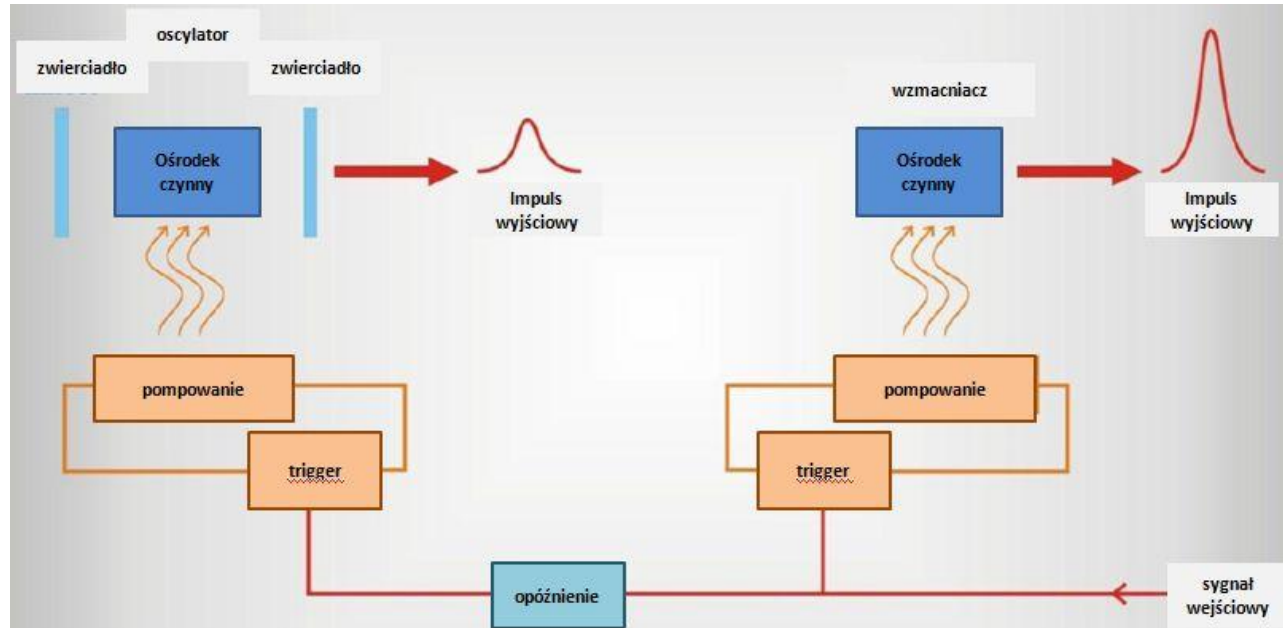
Konfiguracja oscylator-wzmacniacz

Wielostopniowy wzmacniacz mocy składa się z oscylatora laserowego i pompowanego ośrodka czynnego nazywanego wzmacniaczem.



WZMACNIACZE

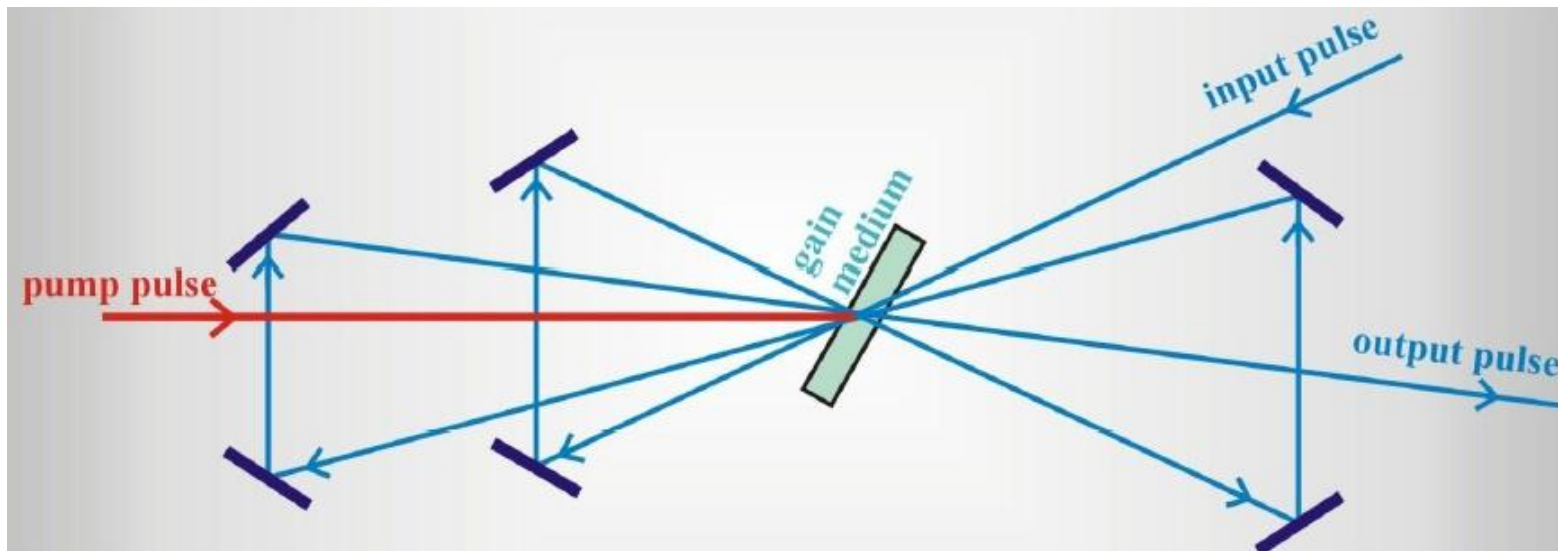
Konfiguracja oscylator-wzmacniacz



Wzmacniacz jest wyzwalany przez oscylator, który generuje impuls początkowy o modulowanej mocy i energii. Impuls z oscylatora przechodzi przez ośrodek czynny wzmacniacza i jego moc wzrasta, w ekstremalnych przypadkach nawet 100-krotnie. Impuls może być dalej wzmacniany przez kolejny wzmacniacz. Konfiguracja taka jest stosowana w przypadku dłuższych impulsów. Wzmacniacze z podwójnym przejściem (double-pass) są stosowane typowo dla impulsów pikosekundowych o energiach około 125 mJ, czasie trwania 60fs, repetycji 20Hz z oscylatorem opartym na nasycających się absorbentach w stanie stałym.

WZMACNIACZE

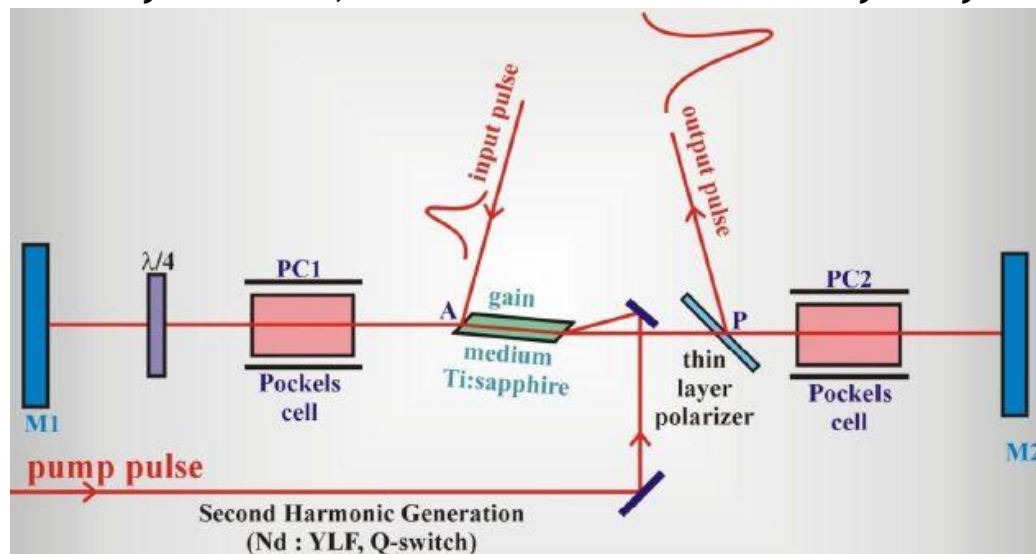
Wzmacniacze wielokrotnego przejścia (MPA- multipass amplifier) są stosowane gdy wymagane są impulsy o ekstremalnie krótkim czasie trwania, krótsze niż 35 fs dla repetycji 1 kHz i energii 1,5 mJ. Konfiguracja ta jest prosta i mniej wrażliwa na zmiany temperaturowe dlatego też jakość wiązki jest znakomita. Relatywnie łatwo można policzyć i skompensować dyspersję pojawiająca się w systemie.



WZMACNIACZE

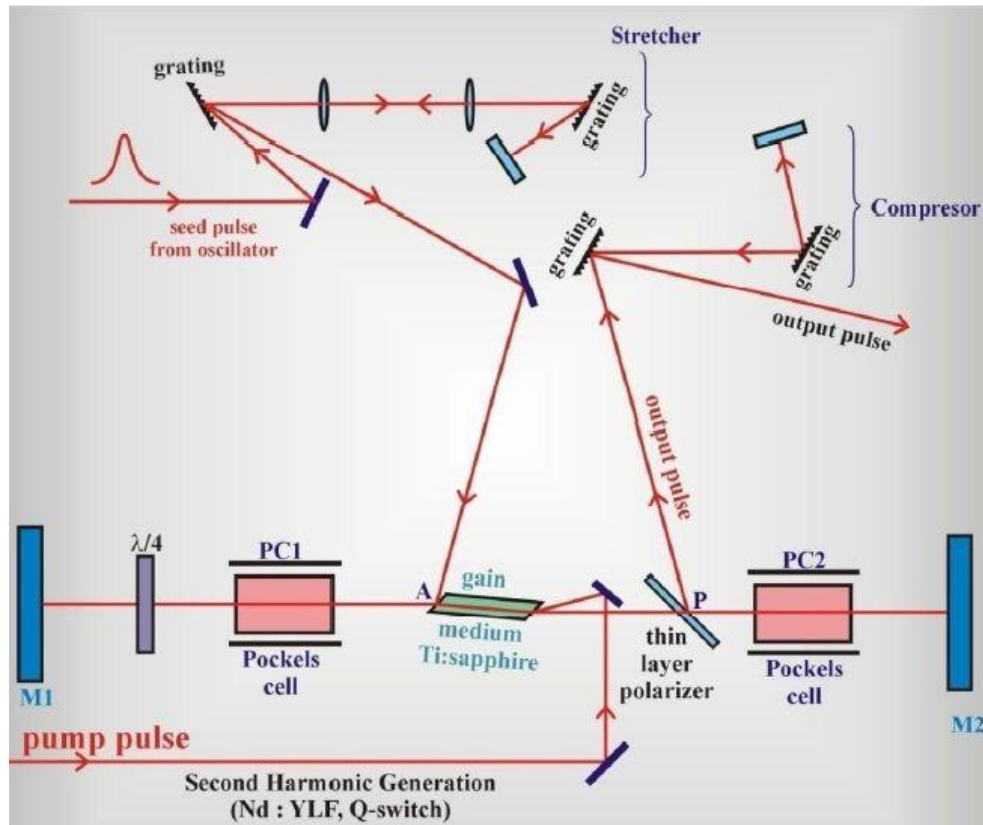
Wzmacniacz regeneratywny (RGA-regenerative amplifier)

Wzmacniacze regeneratywne są stosowane w układach ultraszybkich z relatywnie małą energią wyjściową z oscylatorów femtosekundowych rzędu kilku nJ w celu osiągnięcia energii wyjściowej ze wzmacniacza rzędu 1 mJ dla repetycji 1kHz. Większe energie rzędu 3,5 mJ/impuls i dla wyższych częstości repetycji mogą być osiągnięte przez sprzężenie układów RGA z MPA. Wzmacniacze regeneratywne są również wykorzystywane w celu wygenerowania wysokoenergetycznych impulsów pikosekundowych z niskoenergetycznych impulsów wytwarzanych przez lasery pracujące w reżimie synchronizacji modów. Wzmacniacze regeneratywne są pompowane z wykorzystaniem lamp błyskowych lub lamp łukowych pracy ciągłej. Współcześnie do pompowania wzmacniaczy Nd:YAG, Nd:YLF lub Nd:szkło wykorzystuje się matryce diodowe.



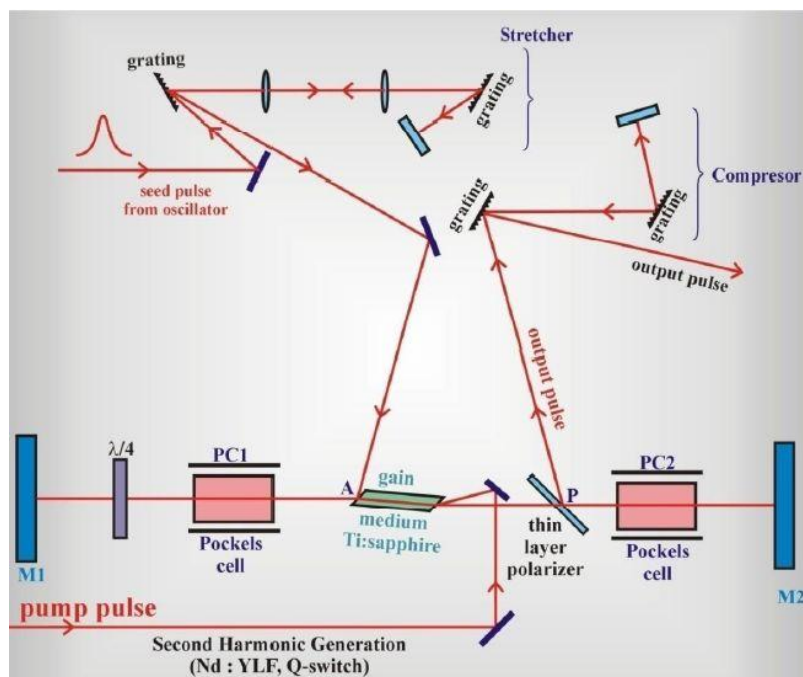
WZMACNIACZE (chirped pulse amplifier -CPA)

Wzmacnianie ultrakrótkich impulsów prowadzi do niezwykle dużych mocy szczytowych, które mogą znacznie przewyższać próg uszkodzenia ośrodka czynnego wykorzystywanego we wzmacniaczu. Aby uniknąć tego problemu zostały opracowane konfiguracje typu CPA.



Typowa konfiguracja wzmacniacza CPA została przedstawiona na poniższym rysunku. Konfiguracja ta składa się ze wzmacniacza regeneratywnego, stretcher'a i kompresora. Stretcher umieszczony jest przed wzmacniaczem regeneratywnym i powoduje wielokrotne wydłużenie czasu trwania impulsu (z femtosekund do setek pikosekund) w celu obniżenia mocy szczytowej impulsu. Wykorzystanie stretcher'a rozwiązuje problemy dużych intensywności ultrakrótkich impulsów we wzmacniaczu, które mogą znacznie przewyższać próg uszkodzenia wykorzystywanego ośrodka czynnego.

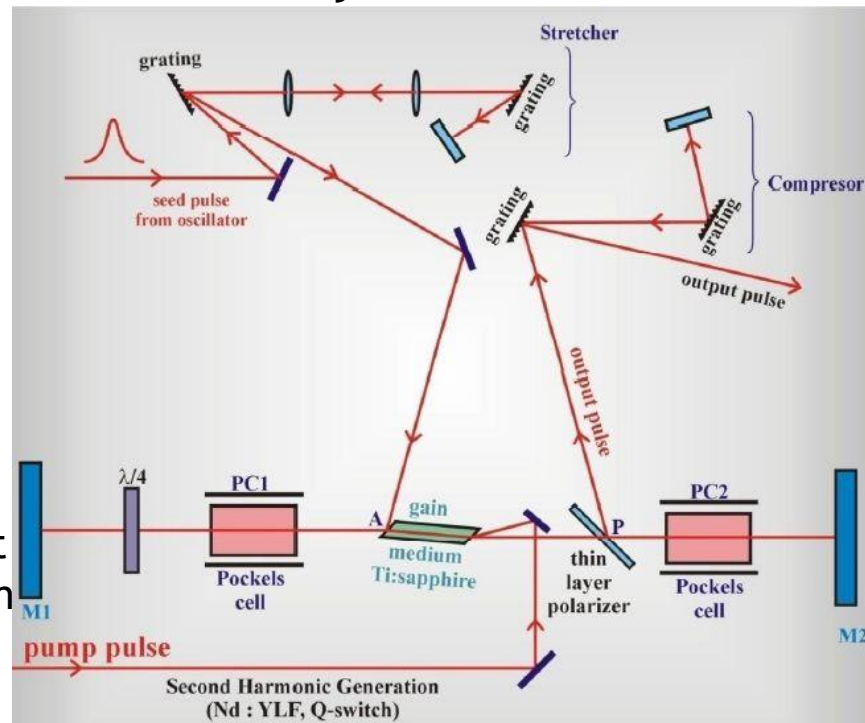
Np.: kryształ tytanowo-szafirowy charakteryzuje się wysokim poziomem nasycenia i wysokim wzmocnieniem (gain-bandwidth) niezbędnym do wygenerowania relatywnie wysokoenergetycznych impulsów subpikosekundowych. Samoogniskowanie w kryształach jest wysoce pożądane ale ma również swoje wady. Wiązka zogniskowana z wykorzystaniem efektu Kerra może prowadzić do zniszczenia kryształu. Koniecznym jest więc zredukowanie intensywności wewnątrz wzmacniacza do rzędów mniejszych niż $10\text{GW}/\text{cm}^2$. Można to osiągnąć stosując technikę CPA.



Zasada działania wzmacniacza regeneratywnego.

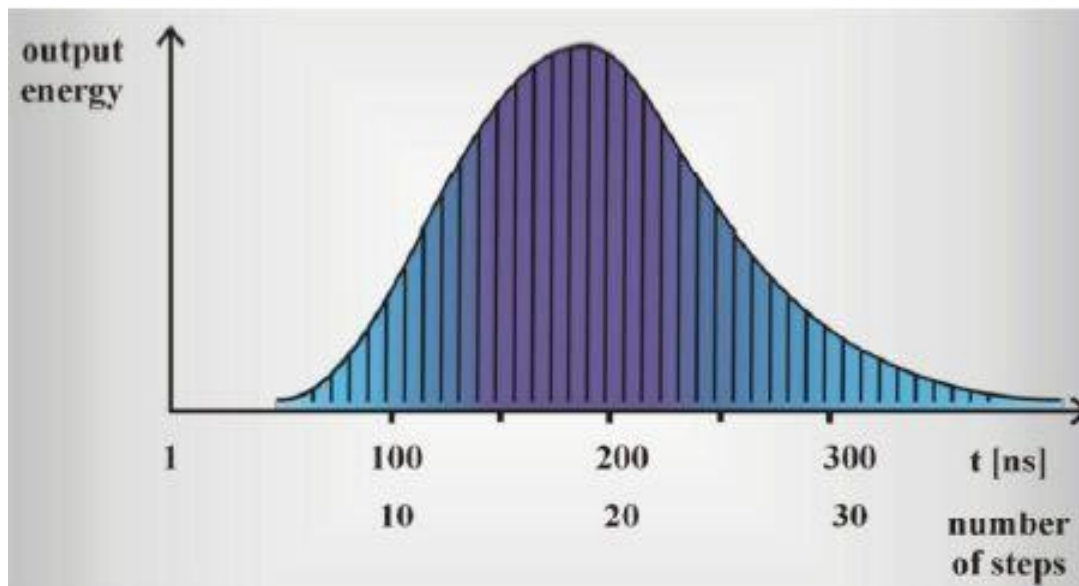
Konfiguracja komercyjnie dostępnego wzmacniacza regeneratywnego składa się z ośrodka czynnego (kryształu Ti-szafir), 2 komórek Pockels'a (PC1, PC2), $\lambda/4$ (ćwierćfalówki) i cienkowarstwowego polaryzatora umieszczonego między zwierciadłami M1 i M2. Ośrodek czynny jest pompowany pod kątem Brewster'a drugą harmoniczną lasera typu Q-switch (ze zmianą dobroci) na ciele stałym Nd:YLF, generującego impulsy o czasie trwania 250ns i średniej energii rzędu 8W. Wzmacniacz regeneratywny wychwytuje pojedynczy impuls z „pociągu” impulsów z lasera pracującego w reżymie synchronizacji modów zwany impulsem zasiewającym. Impuls zasiewający jest pułapkowany we wzmacniaczu i wzmacniany podczas każdego przejścia przez ośrodek czynny około 10-20 razy celem wzmocnienia. Gdy energia wzrośnie 10^6 razy impuls jest wtedy wyrzucany ze wzmacniacza jako impuls wychodzący i może być wykorzystany w dowolnych zastosowaniach. Ilość przejść przez wzmacniacz regeneratywny zależy od czasu dwukrotnego przejścia między zwierciadłami M1 i M2.

Impuls przechodzi przez ośrodek czynny około 10-20 razy celem wzmocnienia. Gdy energia wzrośnie 10^6 razy impuls jest wtedy wyrzucany ze wzmacniacza jako impuls wychodzący i może być wykorzystany w dowolnych zastosowaniach. Ilość przejść przez wzmacniacz regeneratywny zależy od czasu dwukrotnego przejścia między zwierciadłami M1 i M2.



Zasada działania wzmacniacza regeneratywnego.

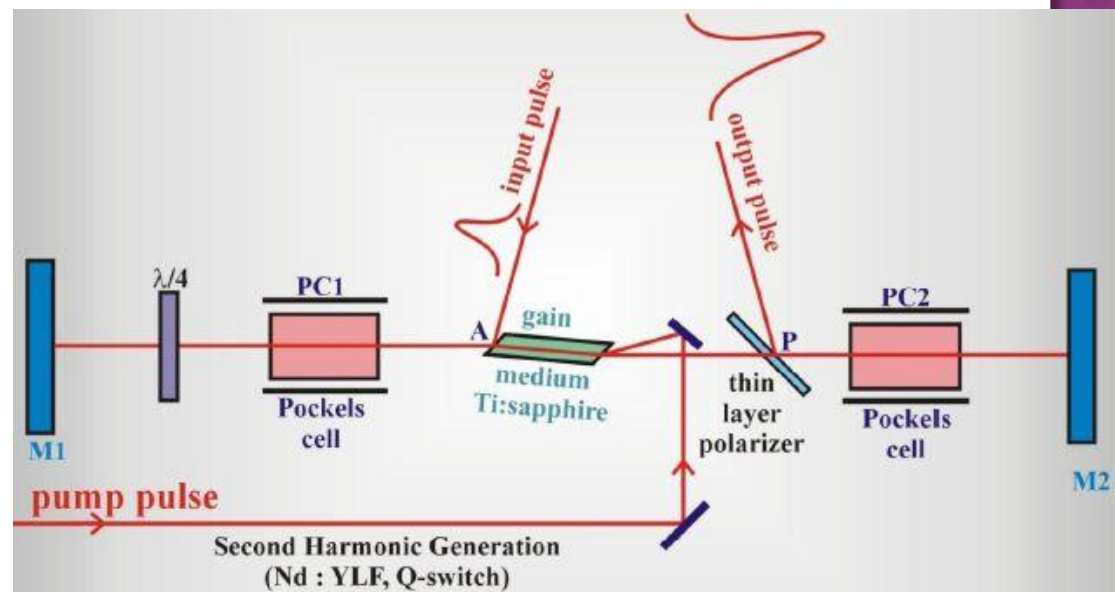
Jeśli czas ten wynosi około 10ns a czas impulsu pompującego wynosi 250ns to typowa ewolucja czasowa energii impulsu we wzmacniaczu regeneratywnym przedstawiona jest na rysunku poniżej. Kształt wzmacnianego impulsu pokrywa kształt impulsu pompującego korelującego z osłabianiem stanu wzbudzenia w ośrodku czynnym. Z poniższego rysunku wynika że impuls powinien być wypuszczony ze wzmacniacza po około 20 przejściach przez ośrodek czynny w momencie maksymalnego wzmocnienia gdy energia wzmacnianego impulsu jest najwyższa.



Zasada pułapkowania impulsu we wzmacniaczu.

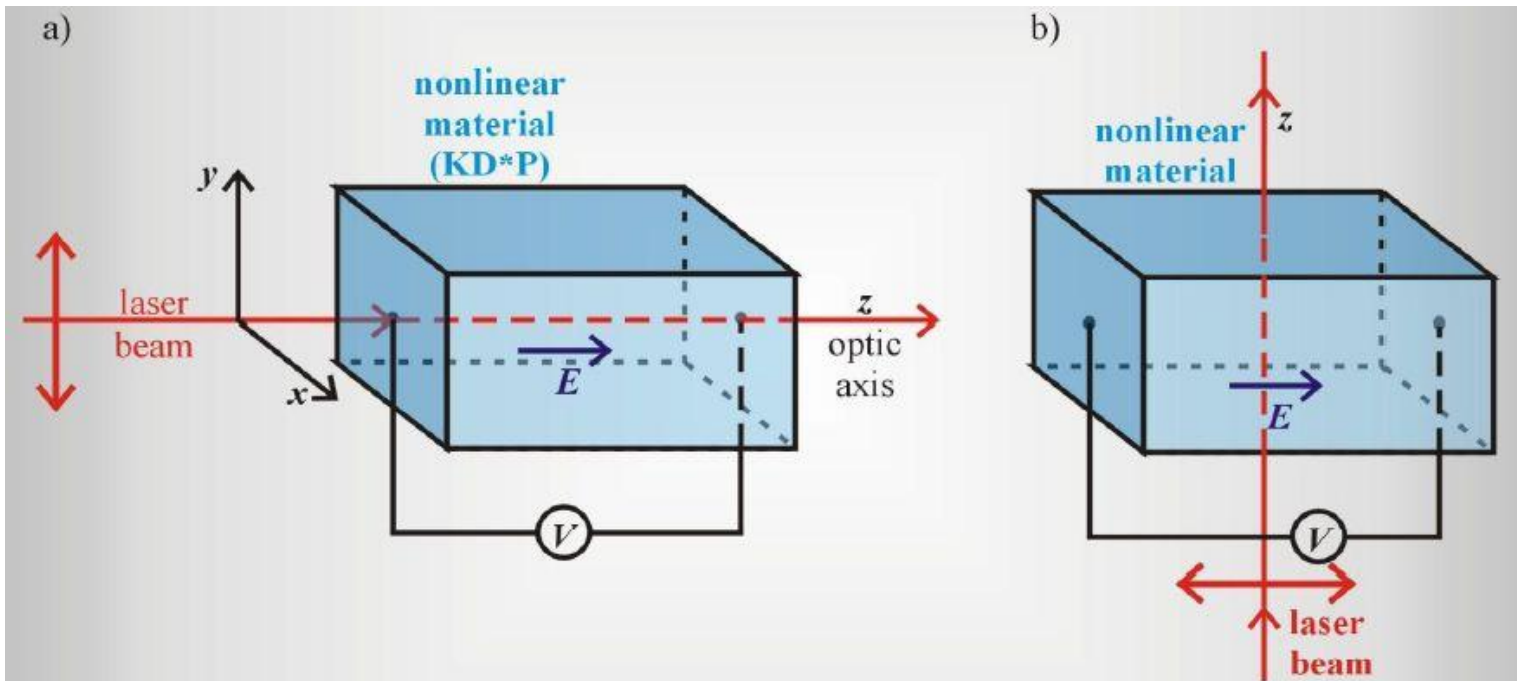
Pokażemy, że impuls jest pułpkowany z wykorzystaniem podstaw polaryzacji. Przypomnijmy, że:

- $\lambda/4$ (ćwierćfalówka) zmienia polaryzację z liniowej na kołową
- $\lambda/4$ zmienia polaryzację o kat 2α gdzie α jest kątem między wektorem polaryzacji a osią optyczną
- polaryzator cienkowarstwowy działa jak polaryzator odbiciowy, który pod kątem Brewster'a odbija polaryzację prostopadłą do płaszczyzny odbicia i przepuszcza polaryzację równoległą i prostopadłą od płaszczyzny odbicia
- komórki Pockels'a działają jak $\lambda/4$ lub $\lambda/2$ (półfalówka) w zależności od przyłożonego napięcia zewnętrznego.



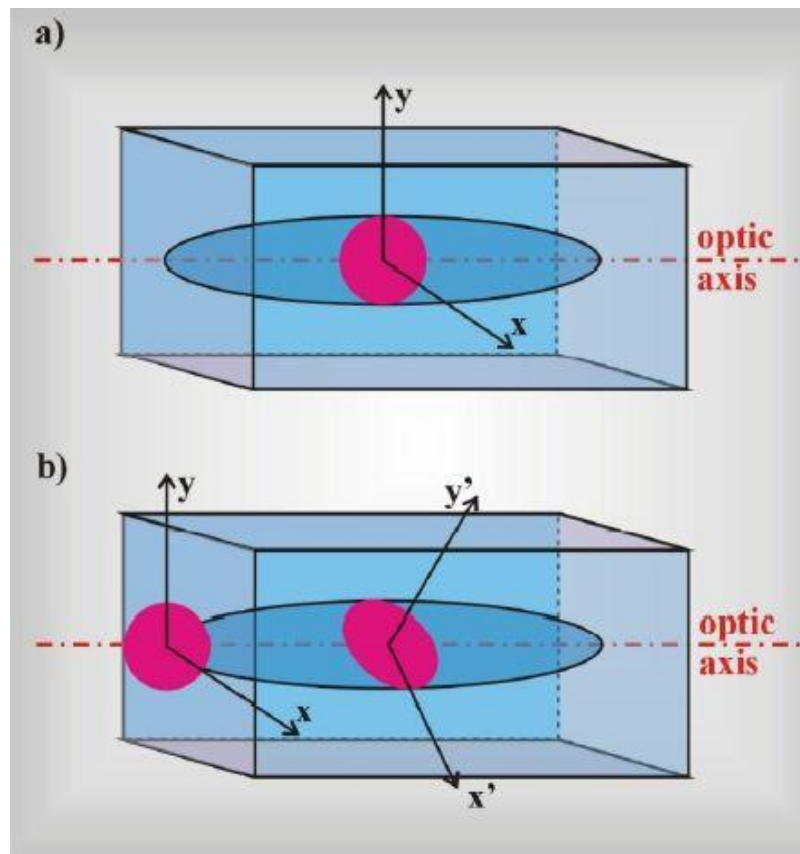
Komórka Pockelsa'a

Komórki Pockelsa'a odgrywają ważną rolę jako elektro-optyczne przełączniki dobroci (electro-optic Q-switch). Komórka Pockelsa'a zawiera ośrodek nieliniowy podłączony od zewnętrznego napięcia. Pole elektryczne może być podłączone równoległe lub prostopadłe do osi optycznej kryształu. Podłączone pole elektryczne powoduje pojawienie się dwójłomności w kryształach. Kryształy wykorzystywane w konfiguracji równoległej są jednoosiowe w nieobecności pola z osią optyczną wzdłuż kierunku z . Elipsoida współczynnika załamania jest kołem obserwowana w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej.



Komórka Pockels'a

Wiązki laserowe mające polaryzację wzdłuż osi x lub y przemieszczają się z takimi samymi prędkościami wzdłuż osi z ponieważ kryształ nie jest dwójłomny wzdłuż osi optycznej. Dla sytuacji pokazanej na rys. a. wiązka laserowa spolaryzowana liniowo wzdłuż osi y przechodzi przez kryształ KD*P nie zmieniona, gdy nie jest przyłożone napięcie. Gdy napięcie zostaje przyłożone równoległe do osi optycznej z , elipsoidalna współczynnik załamania ma kształt elipsoidalny a nie kołowy w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej wzdłuż kierunku x' i y' i jest obrócona o 45° względem osi krystalograficznych x i y rys.b. Kąt 45° jest niezależny od wielkości przyłożonego pola. Dlatego gdy pole działa kryształ KD*P staje się dwójłomny wzdłuż osi z i dzieli wiązkę laserową na dwie składowe (wzdłuż osi x' i y') poruszające się przez kryształ z różnymi prędkościami.



Komórka Pockels'a

Polaryzacja wiązki wyjściowej zależy od różnicy faz między dwiema prostopadle spolaryzowanymi składowymi-promieniem zwyczajnym i nadzwyczajnym, która zależy od przyłożonego napięcia

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} l \Delta n$$

gdzie Δn jest różnicą wartości współczynnika załamania dla promieni zwyczajnego i nadzwyczajnego, l jest długością kryształu.

Można pokazać, że: Δn może być wyrażone jako:

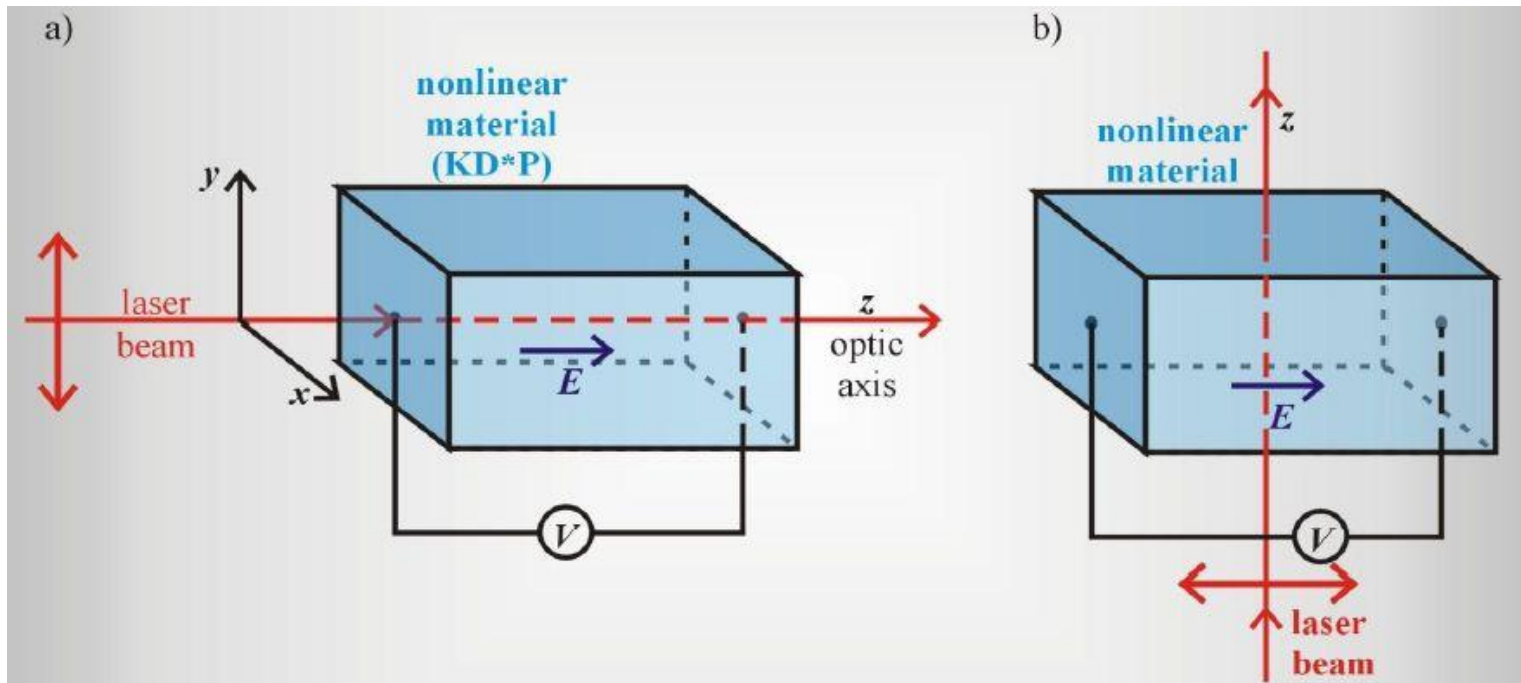
$$\Delta n = n_0^3 r_{63} E_z$$

gdzie r_{63} jest elementem tensora elektro-optycznego rzędu trzeciego będącego odpowiedzią na działanie pola E wzdłuż kierunku E_z , n_0 jest współczynnikiem załamania dla promienia zwyczajnego. Stosując zależność między napięciem V a polem E_z można pokazać, że:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} V_z$$

gdy napięcie V_z jest tak dobrane że różnica faz $\delta = \pi/4$ lub $\pi/2$ komórka Pockels'a pracuje jak $\lambda/4$ lub $\lambda/2$.

Komórka Pockels'a jest najszybszym optycznym urządzeniem przełączającym. Typowe komórki wykorzystują kryształy KD*P o grubości 0.69mm i napięcia dla $\lambda/4$ od 3,5 do 4kV ; 5 do 6kV dla 1.06mm. Komórki Pockels'a są wykorzystywane we wzmacniaczach regeneratywnych do wychwytywania i pułapkowania impulsów.



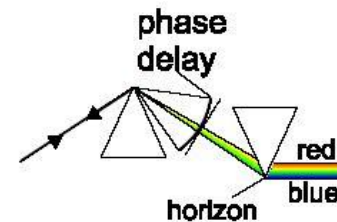
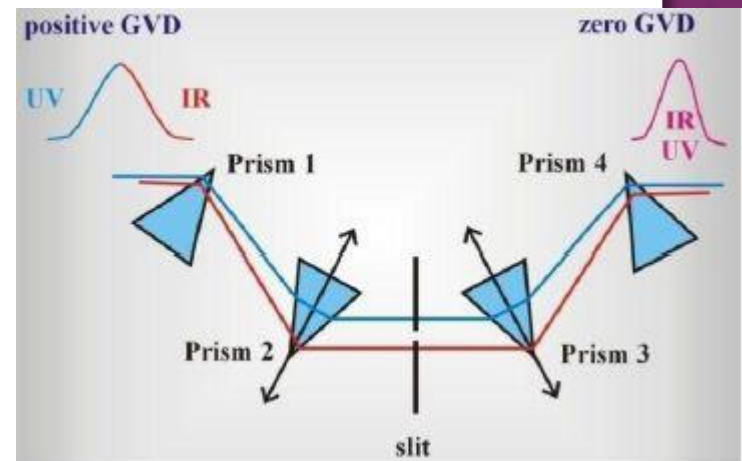
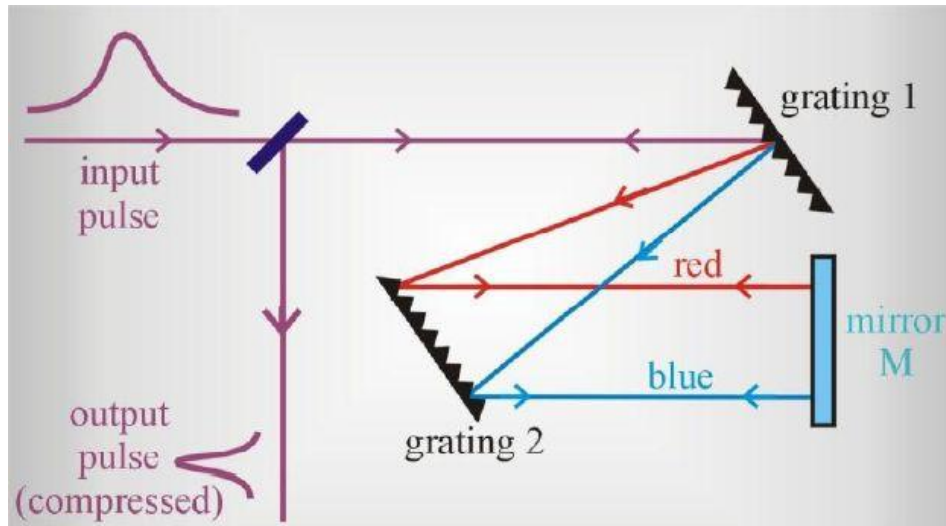
Wiedząc jak działa komórka Pockels'a powróćmy do wyjaśnienia zasady działania wzmacniacza regeneratywnego

1. Wiązka z lasera femtosekundowego (po rozciągnięciu w stretcherze) pada pod kątem Brewstera na kryształ. Ma polaryzację horyzontalną (po wyjściu z Tsunami polaryzacja jest wertykalna, ale retroreflektor zmienia polaryzację na horyzontalną).
2. Komórka Pockelsa PC1 jest jeszcze nie włączona. Wiązka przechodzi dwukrotnie przez $\lambda/4$ (padając na M1 i po odbiciu od niego), która działa więc jak $\lambda/2$ i zmienia polaryzację na wertykalną, promień nie odbija się więc od kryształu, tylko przechodzi przez niego, a następnie przez cienkowarstwowy polaryzator P, odbija się od M2 (PC2 jest nieaktywna)
3. Jeżeli PC1 jest dalej wyłączona wiązka ponownie przechodzi dwukrotnie przez $\lambda/4$ (polaryzacja zmienia się na horyzontalną i zostaje wyrzucona na zewnątrz).
4. Jeżeli jednak w momencie powrotu impulsu do PC1, komórka zostaje włączona (jako $\lambda/4$), wtedy całkowity efekt przejścia do M1 i odbicia wynosi $\lambda/4 + \lambda/4 + \lambda/4 + \lambda/4 = \lambda$. Czyli efekt zmiany polaryzacji zostaje zniesiony i impuls nie wydostaje się na zewnątrz i zostaje uwięziony w rezonatorze przechodząc wielokrotnie przez rezonator i ulegając wzmocnieniu (bowiem na kryształ pada jednocześnie światło z lasera pompującego (Merlin:YLF)).
5. Gdy uznamy, że impuls został dostatecznie wzmocniony ($\approx 10^6$ razy) do komórki Pockelsa PC2 zostaje przyłożone napięcie by zadziałała jak $\lambda/4$. Impuls wędruje do M2 i wracając zmienia polaryzację. Zostaje więc wyrzucony na cienkowarstwowy polaryzatorze.
6. Impuls pada na kompresor, ulega skróceniu i wychodzi ze Spifire'a. 19

Kompresor

Dyspersja prędkości grupowej (GVD) jest najważniejszym czynnikiem wpływającym na czasowe poszerzenie impulsu.

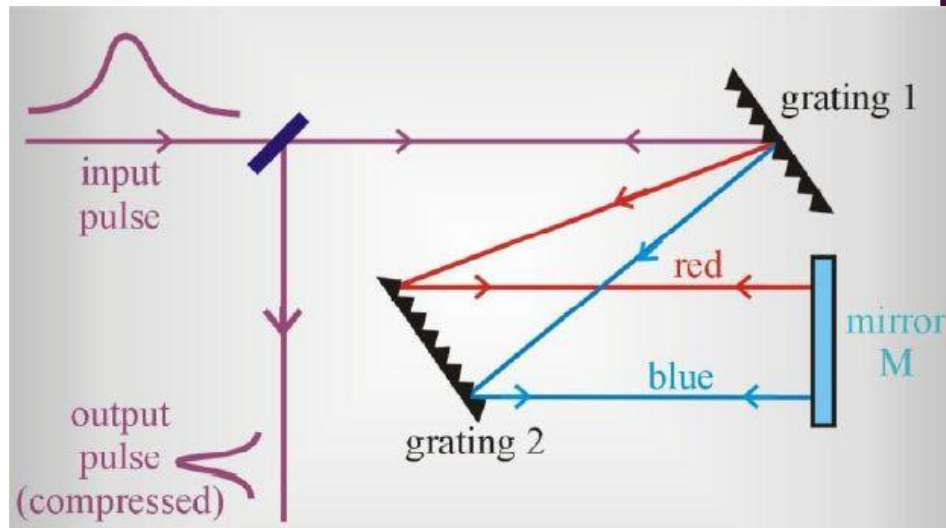
Z powodu GVD każda częstota składająca się na widmo impulsu przechodzi przez ośrodek z różną prędkością grupową. Dla materiałów o dodatnim GVD ($GVD > 0$ *positively chirped*) składowe czerwone poruszają się szybciej niż niebieskie. Do kompensacji GVD można wykorzystywać pryzmaty lub siatki dyfrakcyjne.



Kompresja impulsów

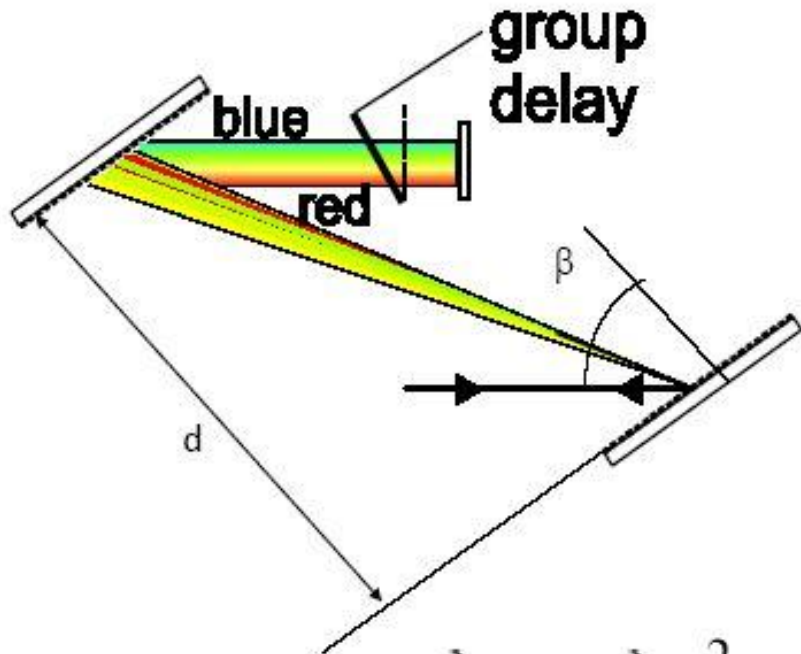
Pary równoległych siatek przedstawiają uproszczony kompresor. Z rysunku poniżej widać że, droga optyczna przez siatki dyfrakcyjne jest dłuższa dla fal dłuższych niż dla krótszych. Lustro M odbija światło z powrotem w siatki odbudowując wiązki przestrzenne, ale nadal powiększa się różnica w drodze optycznej składowych czerwonych i niebieskich.

Tak więc, para równoległych siatek wprowadza ujemną prędkość grupową. Jeśli impuls wejściowy, który wykazuje dodatnie GVD trafi na siatki impuls wyjściowy ulegnie skróceniu ze względu na częściowe skompensowanie dodatniego efektu GVD negatywnym GVD powodowanym przez układ siatek dyfrakcyjnych.



Rozciąganie impulsu jest efektem przeciwnym do kompresji. Siatki mogą być skonfigurowane w taki sposób, aby składowe niebieskie przechodziły dłuższą drogę optyczną przez strecher niż składowe czerwone. Wynikiem czego strecher będzie generował dodatni efekt GVD, a składowe czerwone będą poruszały się szybciej niż dla impulsu wejściowego. W wyniku impuls wychodzący ulegnie czasowemu wydłużeniu.

The grating compressor



Λ : grating period

$$\text{GDD}(\lambda) = -\frac{\lambda}{2\pi c^2} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 d \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\Lambda} - \sin\beta\right)^2\right]^{-3/2}$$

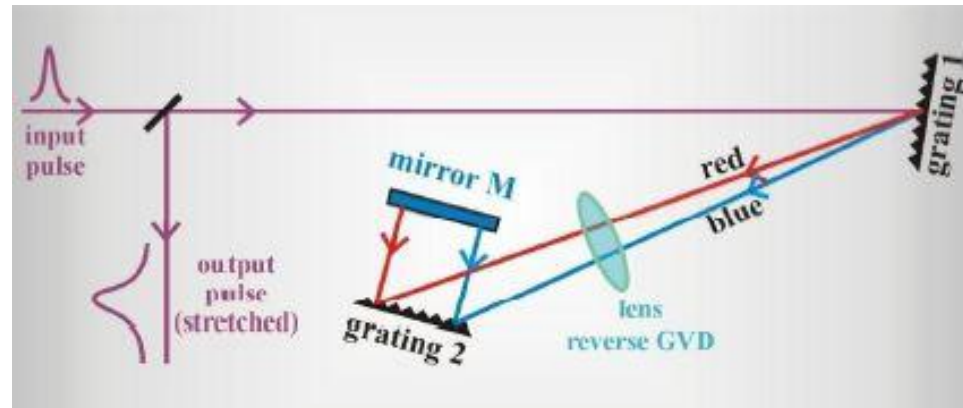


G. Steinmeyer, European Virtual University, <http://mitr.p.lodz.pl/evu>

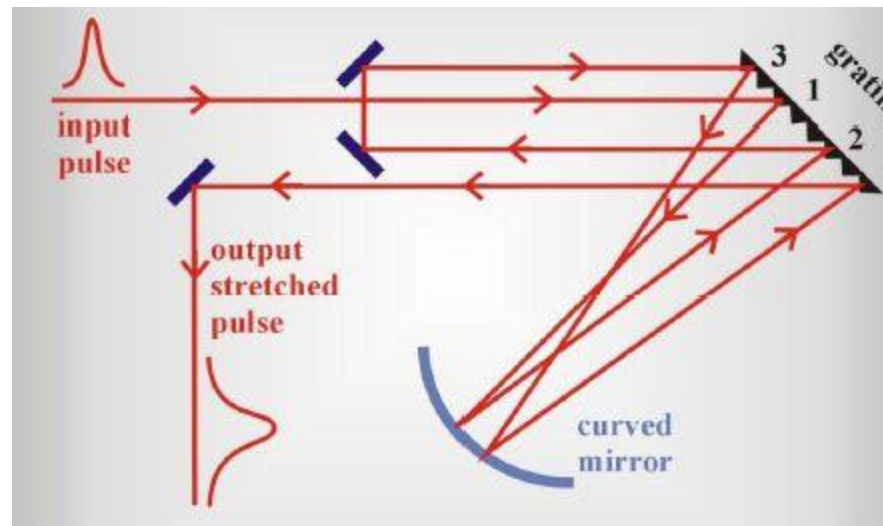
Ref.: E.B.Treacy, *IEEE JQE* 5, 454 (1969)

Stretcher

Główna różnica między stretcher'em i kompresorem polega na dodaniu teleskopu między siatkami dyfrakcyjnymi by odwrócić znak dyspersji z ujemnej na dodatnią.



Możliwe są również inne konfiguracje wykorzystujące np. układ pojedynczej siatki i lustro.



Ostatnia dekada to okres ogromnego postępu we wzmacnianiu impulsów ultrakrótkich. Wzmacnianie impulsów femtosekundowych z wykorzystaniem CPA jest komercyjnie dostępne. Wzmocnienie ultrakrótkich impulsów do mJ odpowiadające multiterawatom stało się rutynową techniką. Technika CPA jest używana tak w konfiguracji wielokrotnego przejścia MPA jak i wzmacniaczach regeneratywnych RGA. Często techniki te są łączone ze sobą w celu uzyskania mocy rzędu terawatów. Zwykle wzmacniacz regeneratywny jest używany jako pierwsze ogniwo za którym następuje wzmacniacz wielokrotnego przejścia.

Zwyczajowo wzmacniacze wielokrotnego przejścia są używane dla impulsów bardzo krótkich $< 50\text{fs}$. Potrzebują one dużo mniejszą ilość materiału do wzmacniania optycznego, które zmniejszają nieliniowe zniekształcenia impulsu, które zwykle odbywa się kosztem dość skomplikowanej procedury konfigurowania i wyższym poziomem wzmocnionej emisji spontanicznej ASE (amplified spontaneous emission). Wzmacniacze regeneratywne są stosowane dla impulsów dłuższych niż 50fs . Mają wiele zalet włączając mniejszą ASE, prosta obsługę i utrzymanie.

Dotychczas omówiliśmy konwencjonalne konfiguracje wzmacniaczy. Ostatnie lata to również dynamiczny rozwój technologii światłowodowych w tym wzmacniaczy opartych na światłowodach. Układ wzmacniacza światłowodowego oparty jest na laserze światłowodowym (domieszkowanym iterbem-Yb), który emituje impulsy o następujących parametrach: 1050nm, 2ps, 300mW 50MHz). Impulsy zasiewające (seed pulse) przechodzą przez światłowód jednodomowy wykazujący dodatnie GVD celem rozciągnięcia impulsu. Następnie impuls jest wzmacniany we wzmacniaczu światłowodowym. Wzmacniacz światłowodowy (domieszkowany Yb, o długości 4,3, średnicy rdzenia 25 μ m) jest pompowany z obu stron diodami półprzewodnikowymi emitującymi promieniowanie o długości 976nm i mocy 14W. Impuls zasiewający jest wzmacniany do 13W, a czas jego trwania wzrasta od 2ps do 5ps.

Następnie impuls jest kompresowany do 100fs w konwencjonalnym kompresorze wykorzystującym siatki dyfrakcyjne osiągając 5W dla 1050nm.

