

# Өндөр давталт, хэт богино пульстай лазерын титан саффирын осцилляторын дизайн

Д.Өнөрбилэг, Ц.Хос-Очир<sup>1</sup>, П.Мөнхбаатар, Э.Номин-Эрдэнэ, Ц.Баатарчулуун, Ж.Даваасамбуу\*

*Лазерын Судалгааны Төв, Монгол Улсын Их Сургууль, Улаанбаатар-14201*

МУИС-ийн лазерын судалгааны төвд Керр эффектээр моод түгжих аргаар өндөр давталттай, фемтосекундийн лазерын пульс үүсгэх титан саффирын осцилляторын дизайныг боловсруулан угсарлаа. Энэ өгүүлэлд титан саффирын осцилляторын бүтэц, дизайн, ажиллах зарчмыг танилцуулна.

Түлхүүр үг: фемтосекундын хэт богино пульс, титан саффирын осциллятор, Керр эффект.

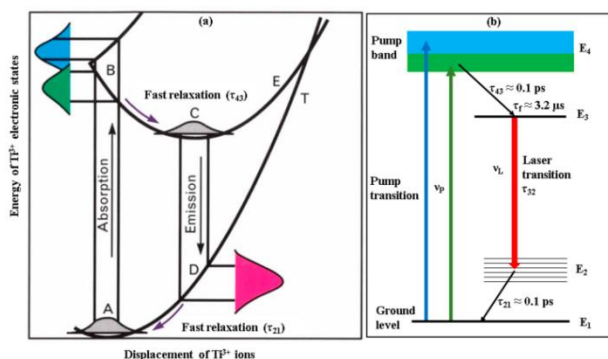
## Оршил

Орчин үеийн физик, техник технологи, судалгааны түвшинд лазерын онцгой нэг хэлбэр болох хэт богино пульс бүхий лазерын хөгжүүлэлт, хэрэглээ улам бүр чухал ач холбогдолтой болж байна. Хэт богино пульстай лазерыг хөгжүүлэх зорилго нь 1) лазерын туяаг фокуслах замаар маш өндөр пикийн чадал, эрчим бүхий цацаргалтыг гарган авах, 2) хугацаагаар ялгах хэмжилтийг гүйцэтгэх, ингэснээр маш хурдан явагдах янз бүрийн процессууд, тухайлбал химийн урвалын динамик, биологийн процессыг судлах боломжийг бүрдүүлэх юм. Анхны лазерыг зохион бүтээснээс хойш олон улсын түвшинд лазерын пульсыг улам богино болгох ажилд ихээхэн дэвшил гарч, фемтосекундийн ( $10^{-15}$ с), аттосекундийн ( $10^{-18}$ с) болон мегаваттын ( $10^6$  Вт), гегаваттын ( $10^9$  Вт) пикийн чадалтай хэт богино пульс лазерыг бий болгон ашиглаж байна. 1990-ээд оноос эхлэн квант электроник, шугаман бус оптикын салбарт ахиц, хөгжил гарснаар титан саффирын кристалл дээр үндэслэсэн, фемтосекундийн хугацаанд үргэлжлэх тогтвортой лазерын пульсыг үүсгэн хөгжүүлж байна[1, 2]. МУИС-ийн лазерын судалгааны төвд хэрэгжүүлж буй “Өндөр давталттай, хэт богино титан саффирын пульс лазер төхөөрөмж угсрах” төслийн хүрээнд бид тасралтгүй ногоон өнгийн лазерыг ашиглан, Керр эффектээр фемтосекундийн лазерын пульс үүсгэх титан саффирын осцилляторын дизайныг боловсруулан угсарлаа. Энэ нь өсгөгч орчин-титан саффир( $\text{Ti:sapphire}$ ) кристалл болон сөрөг

дисперстэй хос толь, бүрэн ойлгогч арын толь ба гаралтын гэсэн дөрвөн толиноос тогтоно. Осцилляторын давуу тал нь энгийн компакт бүтэцтэй, сөрөг дисперстэй тусгай түрхлэг бүхий толь сонгосноор, пульсын хэлбэр сунахгүй байх, тогтвортой ажиллах нөхцлийг хангана.

## Титан саффирын шинж чанар

Титан саффир ( $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ ) нь титанаар хольцолсон хөнгөн цагааны оксид ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) бөгөөд  $3d^1$  электрон бүхий титаны  $\text{Ti}^{+3}$  ион нь хүчилтөрөгчийн 6 атомтай холбогдож октаэдрьг үүсгэдэг. Титаны ионууд кристаллын оронтолын харилцан үйлчлэлд орж үндсэн ба өдөөгдсөн энергийн төлөвүүд хэлбэлзлийн энергийн дэд бүсүүдэд хуваагддаг (1-р зураг). Өдөөгдсөн төлөвийн албадмал цацаргалтаас гадна, фононы харилцан үйлчлэлийн албадмал цацаргалт дагалдаж, титан саффир нь маш өргөн цацаргалтын спектртэй болох ба энергийн 4 түвшинтэй системд хамаарна [3,4].



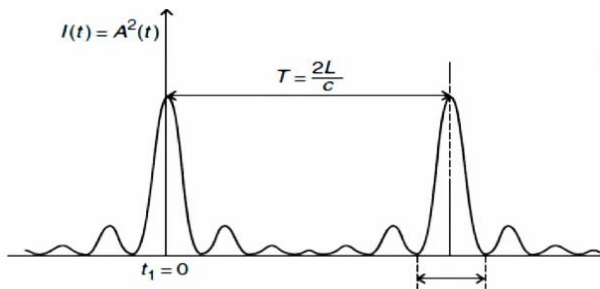
1-р зураг. Титан саффирын энергийн түвшиний диаграмм.

\* Electronic address: davaasambu@num.edu.mn

Иймд титан саффир нь (Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) гэрлийг 400 – 600нм мужид шингээж, 650–1100нм өргөн мужид цацаргадаг. Нөгөө талаас Гауссын хэлбэрт пульсын хувьд, тодорхойгүйн зарчим ёсоор пульсын үргэлжлэх хугацаа  $\tau_p$ , ба спектрийн өргөн  $\Delta\nu_p$ , дараах хамааралтай[4].

$$\tau_p \times \Delta\nu_p = \frac{2 \ln 2}{\pi} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (1)$$

энд:  $a$  -пульсын өргөнтэй холбоотой параметр бол  $b$ –осцилляторын дотоод дисперсээс хамаарсан давтамжийн шилжилттэй холбоотой параметр. Гауссын цацрагийн хувьд пульсын өргөн дисперс нөлөөлөхгүй бол дээрх харьцаа  $\tau_p \times \Delta\nu_p \approx 0.44$  болно. Өргөн спектр бүхий цацаргалт хугацааны хувьд богино пульс үүсгэх боломжтой байдаг.



2-р зураг. Гауссын хэлбэрт пульс.

### Осцилляторын ажиллах зарчим

Лазерын пульсыг гаргах энергийн хувьд үр ашигтай арга бол тасралтгүй үргэлжлэх лазерын үзүүлэлтийн (фаз, амплитуд) дотоод модуляцаар хугацааны богино агшинд гэрлийг нэвтрүүлэх юм[5]. Бид лазерын пульс үүсгэх түгээмэл арга болох Керр эффектээр моод түгжих аргыг ашиглана.

Тасралтгүй үргэлжлэх (cw) лазерын осцилляторт оптик тэнхлэгийн дагуу  $m\lambda = 2L$  зогсонги долгионы нөхцөлийг хангасан олон тооны тууш (longitudinal) долгионууд (моодууд) хэлбэлзэх боломжтой. Үүнд  $\lambda$  – долгионы урт,  $m$ – моодын нийт тоо,  $L$ – осцилляторын урт болно. Лазерын осцилляторт эдгээр моодын фазууд харилцан хамааралтай болж, нэгэн зэрэг хэлбэлзэж эхлэх буюу “моод түгжсэн”-ээр бөгөөд өндөр эрчимтэй пульс үүсдэг.  $N$  тооны моодын хувьд гаралтын пульсын үзүүлэлт дараах байдлаар тодорхойлогдоно [3].

$$I_{peak} \approx N^2 E_0^2 \quad (2)$$

энд:  $I$  – пикийн эрчим нь моодын тоотой шууд хамааралтай.

$$T = \frac{1}{\Delta\nu} = \frac{2L}{c} \quad (3)$$

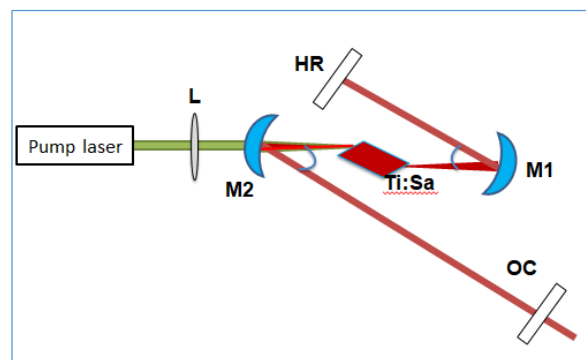
$$\tau_p = \frac{1}{N \cdot \Delta\nu} = \frac{2L}{N \cdot c} \quad (4)$$

$T$  – давталтын хурд нь  $L$  урттай осцилляторт пульсын нэг бүтэн аялах хугацаагаар тодорхойлогдоно.

$\tau_p$  – пульсын өргөн буюу үргэлжлэх хугацаа нь  $L$  уртаас гадна, моодын тооноос хамаарна.

### Туршилт

Бидний угсарсан титан саффирын осцилляторын туршилтын схемийг 3-р зурагт харуулсан.  $Z$  хэлбэрийн осциллятор нь лазерын өсгөх орчин титан саффирын кристалл, осцилляторт үүсэх дисперсийг арилгахын тулд сөрөг дисперстэй бөмбөлөг толь (M1, M2), бүрэн ойлгогч арын толь (HR), гаралтын толь (OC) болон өдөөгч лазераас тогтоно. Титанаар хольцолсон (~0.33wt%) 2 мм зузаан Ti:sapphire кристаллыг Брюстерийн өнцгөөр байрлуулсан. HR арын толь нь 98% ойлголттой 600–1200нм долгионы уртад бараг тэг дисперстэй. Сөрөг дисперстэй бөмбөлөг хос тольны (LAYERTEC GmbH) муруйлтын радиус 50мм, түүний фокусын цэг дээр кристаллыг байрлуулсан.



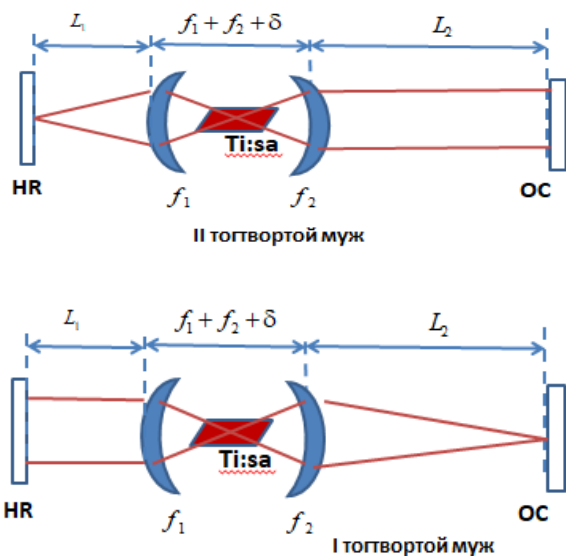
3-р зураг. Титан саффирын осцилляторын туршилтын схем. Өдөөгч лазер- Millenia@532 нм.  $L$  – фокуслах линз, HR – бүрэн ойлгогч арын толь, Ti:sapphire – лазерын өсгөх орчин, M1;M2 – сөрөг дисперстэй бөмбөлөг толь, OC- гаралтын толь, □□- нугалах өнцөг.

Өдөөгч ногоон өнгийн (532нм) тасралтгүй үргэлжлэх лазерын (Nd:YAG, MilleniaeV)

гаралтын чадал 5Вт, гаралтын толь 5% нэвтрэлттэй, осцилляторын урт 2.08м учир давталтын хурд 144МГц орчим болно. M1,M2 хос толь нь а) Керр эффектээр моод түгжих б) осцилляторын дотоод дисперсийн нөлөөг арилгах гэсэн 2 чухал үүрэгтэй.

Осцилляторыг дөрвөн толь бүхий давхар резонаторын схемээр дэлгэж харууллаа (4-р зураг). Бид осцилляторт пульс лазер тогтвортой мужийг хангах M1,M2 толь, үүсэх кристаллын харилцан байрлалыг ABCD матрицын аргаар симуляцаар урьдчилан тодорхойлсон[6]. Осцилляторын M1,M2 бөмбөлөг толины фокусын зайн нийлбэрийг  $\delta$  утгаар шилжүүлэхэд ( $0 < \delta < \delta_1$ ) ба ( $\delta_2 < \delta < \delta_3$ ) гэсэн хоёр тогтвортой муж үүсэх боломжтойг тооцоолсон. Үүнд:

$$\delta_1 = \frac{f_2^2}{L_2 - f_2} = 0.925 \text{ mm} \quad \text{ба} \quad \delta_2 = \frac{f_1^2}{L_1 - f_1} = 2.35 \text{ mm}$$



4-р зураг. Осцилляторын тогтвортой мужууд.

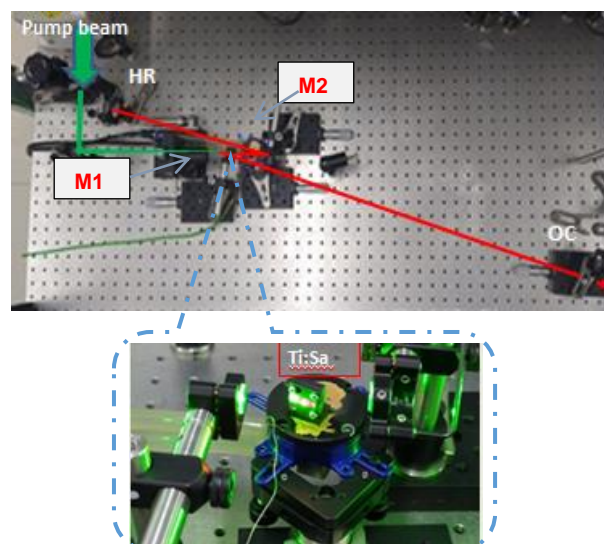
### Дисперсийн компенсаци

Бид үүсэх пульсын өргөнийг аль болох богино байлгахын тулд осцилляторын дотор пульсын туулах агаар, титан саффирын кристалл зэрэг элементээс үүсэх эерэг дисперсийг нөхөх эсвэл нийт групп дисперсийн утгыг бага зэрэг сөрөг болгох шаардлагатай. Үүнд 2мм зузаан титан саффирын кристалл ба 2.08м урттай осциллятор дотор туулах агаарын хугарлын илтгэгчээс хамаарах групп дисперс нь 800 нм урттай долгионы хувьд  $+286 \text{ фс}^2$ . Уг долгионы мужид

M1, M2 бөмбөлөг толь ба гаралтын толь харгалзан  $-70 \text{ фс}^2$  ба  $-20 \text{ фс}^2$  групп дисперстэй байхаар тус тус сонгосон. Үүнд лазерын пульс осцилляторт нэг бүтэн аялахдаа M1,M2 толь дээр 4 удаа ойно гэж үзвэл нийт групп дисперс  $\sim 300 \text{ фс}^2$  буюу бага зэрэг сөрөг ( $286 \text{ фс}^2 - 300 \text{ фс}^2 = -14 \text{ фс}^2$ ) болно.

### Тасралтгүй үргэлжлэх лазерын ажиллагаа

Бид 3-р зурагт үзүүлсэн схемийн дагуу титан саффирын осцилляторыг угсарлаа. Үүнд 532нм долгионы урттай, өндөр эрчимтэй (максимум чадал 4.5Вт) ногоон лазер L линзээр нэвтрэн, титан саффирын кристалл дээр фокуслагдаж, M1,M2 бөмбөлөг толиор дамжин HR ба ОС толиноос бүрдэх осцилляторт Z хэлбэрийн замаар аялах бөгөөд тухай бүр кристаллаар дайран өсгөгдөн  $\sim 820 \text{ нм}$  долгионы урттай тасралтгүй үргэлжлэх улаан лазерыг үүсгэсэн. Тасралтгүй лазерын спектрийг 6-р зурагт үзүүлэв. Микрометрийн шилжилттэй гүйгч тавцан дээр байрлуулсан элементүүдийг хөдөлгөх замаар туршихад, тасралтгүй лазер II мужид илүү тогтвортой үүсэж байна. Кристаллд дулаан хуримтлагдахаас сэргийлж, усан хөргүүр ашигласан. Туршилтын явцад кристаллын температур  $19.7 \pm 0.1^\circ \text{C}$  байна.



5-р зураг. Туршилтын схем-фото, Керр эффект үүсэх орчинг (Ti:sapphire кристалл ба M1,M2 бөмбөлөг толь) тасархай шугамаар дүрслэв.

### Керр эффектээр моод түгжих арга

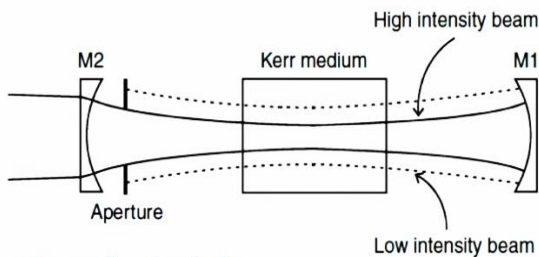
Хатуу төлөвт тасралтгүй лазераас хэт богино пульс үүсгэх механизм бол оптик Керр эффектээр лазерын моод түгжих арга юм. Оптик

Керр эффект нь материалын хугарлын илтгэгч гэрлийн эрчимээс шугаман бус хуулиар хамаарах үзэгдэл.

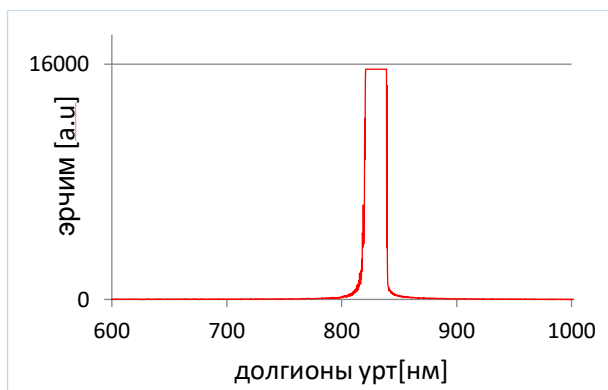
$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

энд:  $n_0$ ,  $n_2$  – шугаман ба шугаман бус хугарлын илтгэгч,  $I$  – гэрлийн эрчим

Өндөр эрчимтэй Гауссын лазераар өдөөхөд титан саффирын кристаллын хугарлын илтгэгч шугаман бусаар өөрчлөгдөж, кристалл дотор өөрийн фазын модуляц, өөрөө фокуслах үзэгдэл эгшин зуур явагдаж лазерын моод түгжигдэнэ.



Керр эффект үүсэх орчин болох кристалл ба M1, M2 бөмбөлөг толиноос тогтох дотоод осцилляторыг дээрх зургаар дүрслэв. Тиймээс фемтосекундийн хугацаатай хэт богино пульс үүсэх урьдчилсан нөхцөл нь титан саффирийн осцилляторт тасралтгүй лазер үүсгэх, түүний дараа шугаман бус Керр эффектээр лазерын моодыг түгжихэд хангалттай хэмжээний эрчим буюу гаралтын чадлыг тодорхой утгад хүргэх шаардлагатай.

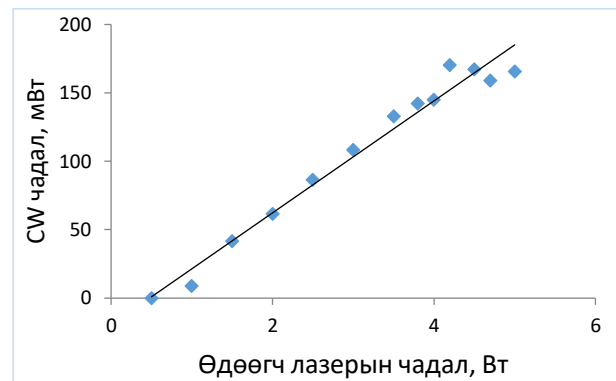


6-р зураг. Титан саффирын осцилляторт үүссэн тасралтгүй үргэлжлэх лазерын спектр (өдөөгч лазерын 4.5Вт чадалд харгалзах спектр).

**Хэлэлцүүлэг**

Бид тасралтгүй үргэлжлэх (cw) лазерын чадлыг 5% нэвтрэлттэй ОС гаралтын толь, дижитал ваттметр ашиглан хэмжсэн. Үүнд өдөөгч лазерын 4.5Вт чадалд харгалзах гаралтын чадал 200мВт орчим байна. Олон улсын түвшинд

хийгдсэн ижил төрлийн ажлуудаас үзэхэд, гаралтын чадал ихэвчлэн оролтын чадлын 10–15% орчим буюу 400мВт орчим утгад хүрвэл Керр эффектээр лазерын моод түгжих механизмыг хэрэгжүүлэхэд илүү хялбар байдаг байна[7-8]. Тиймээс бид цаашид осцилляторын гаралтын чадлыг өсгөх шаардлагатай арга хэмжээ авах, боломжит учир шалтгааныг хайж байна.



7-р зураг. Тасралтгүй лазерын гаралтын чадал.

**Дүгнэлт**

Керр эффектээр моод түгжих аргаар пульс үүсгэх титан саффирын осцилляторын дизайныг боловсруулан, туршилтын схемийг амжилттай угсарлаа. Осцилляторын дотор үүсэх нийт групп дисперсийг нөхөх зорилгоор, сөрөг дисперстэй тусгай түрхлэг бүхий бөмбөлөг толь сонгосноор, пульсын үргэлжлэх хугацаа богино байх, тогтвортой ажиллах нөхцлийг хангана гэж үзсэн. Бидний угсарсан осцилляторт лазерын өсгөх орчинд титан саффирын кристалл ашигласнаар ~10фс орчим хугацаанд үргэлжлэх, 144МГц давталтын хурдтай хэт богино пульс үүснэ. Өдөөгч лазерын өндөр эрчимтэй, Гауссын хэлбэртэй цацраг нь Керр эффектээр моод түгжих механизмыг хэрэгжүүлэхэд тохиромжтой бөгөөд урьдчилсан нөхцөл болох титан саффирын осцилляторт тасралтгүй лазерыг үүсгэсэн. Цаашид лазерын гаралтын чадлыг өсгөх шаардлагатай арга хэмжээ авахаар боломжит учир шалтгааныг судалж байна.

**Талархал**

Энэхүү судалгааны ажил нь БСШЯ-ны ШУТ сангийн санхүүжилтээр хийгдэж байна. Туршилтыг гүйцэтгэхэд тусалсан МУИС-ийн

лазерын судалгааны төвийн хамт олонд талархал илэрхийлье.

### Ном зүй

- [1] F. X. Kartner, Few-cycle Laser Pulse Generation and Its Applications (Springer, Berlin, 2004).
- [2] П.Г.Крюков “Лазеры ультракоротких импульсов, их применения” (Издательский Дом, Интеллект, 2012), ISBN 978-91559-091-4
- [3] L. Xu, G. Tempia, A. Poppe, M. Lenzner, Ch. Spielman, F. Krausz, A. Stingl and K. Ferencz, Appl. Phys. B 65, 151 (1997).
- [4] Mark Eichhorn, Laser Physics, DOI10.1007/978-3-319-05128-4, @Springer Publishing (2012)
- [5] Bahaa.E.A.Saleh,M. Carl Teich ”Fundamentals of photonics”, Willey Interscience, Boston University (2007).
- [6] E.Nomin-Erdene, D.Unurbileg, P.Munkbaatar, Ts.Baatarchuluun, Ts.Khos-Ochir, J.Davaasambuu, Simulation of femtosecond pulse in Kerr-lens mode locked Ti:sapphire laser IOP. Conference Material. (2019).
- [7] U. Morgner, F. X. Kartner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. An-gelow and T. Tschudi, Opt. Lett. 24, 411 (1999).
- [8] R. Szipocs, K. Ferencz, C. Spielmann and F. Krausz, Opt. Lett. 19, 201 (1994).
- [9] R. Szipocs, K. Ferencz, C. Spielmann and F. Krausz, Opt. Lett. 19, 201 (1994).
- [10] N. Matuschek, F. X. Kartner and U. Keller, IEEE J. Quantum Elect. 35, 129 (1999).