

ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ RỘNG XUNG BƠM LÊN BIẾN ĐỔI QUANG NHIỆT TRONG HOẠT CHẤT LASER RẮN

Mai Văn Lưu^{1*}, Nguyễn Thanh Vân², Nguyễn Thuỳ Trang³

¹Trường Đại học Mở Hà Nội

²Trường THPT Nam Kỳ Khởi Nghĩa, Huyện Châu Thành, Tỉnh Tiền Giang

³Trường THPT Đức Hòa, Huyện Đức Hòa, Tỉnh Long An

*Email: luumv@hou.edu.vn

Ngày gửi bài: 19/9/2022; Ngày chấp nhận đăng: 18/11/2022

TÓM TẮT

Mô hình laser rắn bơm dọc bằng laser bán dẫn đã được trình bày. Sử dụng biểu thức mô tả hệ số biến đổi quang nhiệt trong hoạt chất laser rắn, bài báo khảo sát bằng số ảnh hưởng của độ rộng xung bơm lên phân bố biến đổi quang nhiệt. Kết quả cho ta một số bình luận về việc sử dụng xung laser bán dẫn bơm dọc cho laser rắn hoạt chất Nd:YVO₄.

Từ khoá: Laser rắn, bơm dọc, độ rộng xung, biến đổi quang nhiệt.

1. MỞ ĐẦU

Bức xạ laser là một chùm ánh sáng kết hợp, đơn sắc với độ phân kỳ nhỏ và có thể có cường độ rất lớn. Ngoài các tính chất trên, còn có một số laser có thể thay đổi được bước sóng liên tục trong một vùng phổ nhất định. Nhờ đó, ứng dụng của laser trong khoa học, công nghệ và cuộc sống ngày càng đa dạng, phong phú.

Khi laser hoạt động, đồng thời với quá trình này là quá trình sinh nhiệt trong hoạt chất. Quá trình này chủ yếu do năng lượng bơm dư thừa không tham gia vào quá trình hấp thụ cưỡng bức và do quá trình chuyển dịch không bức xạ (phát xạ phonon). Năng lượng dư thừa đó gây ra quá trình dao động nội của hoạt chất laser và kết quả là quá trình sinh nhiệt xảy ra trong hoạt chất. Hiện tượng sinh nhiệt không đồng nhất trong hoạt chất, thông thường ở tâm nhiệt độ sinh ra lớn hơn ở biên hoạt chất. Đây là nguyên nhân gây nên hiện tượng gradient nhiệt trong môi trường hoạt chất, kết quả là ảnh hưởng đến cấu trúc chùm tia, ảnh hưởng đến tần số làm việc của laser [1-3].

Như vậy, vấn đề đặt ra là trong công nghệ chế tạo laser, làm sao có thể hạn chế tối đa ảnh hưởng không tốt của hiệu ứng nhiệt đến chất lượng chùm tia phát? Một trong những phương án được lựa chọn đó là hạn chế tối đa phần năng lượng bơm chuyển hóa thành năng lượng nhiệt trong hoạt chất. Hay nói cách khác, bằng cách nào đó có thể điều khiển được hệ số biến đổi quang nhiệt trong quá trình hoạt động của laser. Trong nghiên cứu này, thông qua khảo sát ảnh hưởng của độ rộng xung bơm lên hệ số biến đổi quang - nhiệt, bằng kết quả nghiên cứu lý thuyết nhóm tác giả đã định hướng thực nghiệm cho việc nâng cao hiệu suất làm việc của laser rắn.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã nghiên cứu nguyên lý cấu tạo và hoạt động của

laser rắn bơm dọc bằng laser bán dẫn; nghiên cứu hiệu ứng quang - nhiệt, quá trình chuyển đổi quang - nhiệt trong hoạt chất laser rắn. Trong quá trình nghiên cứu, chúng tôi đã kế thừa và sử dụng một số thông tin, kết quả nghiên cứu của các tài liệu liên quan đã công bố trước đây.

2.2. Phương pháp mô phỏng số

Từ việc dẫn ra biểu thức mô tả phần năng lượng bơm chuyển hóa thành nhiệt trong hoạt chất trong quá trình hoạt động của laser. Nhóm nghiên cứu đã sử dụng phương pháp mô phỏng số bằng phần mềm Maple để mô phỏng ảnh hưởng của độ rộng xung bơm đến hệ số biến đổi quang nhiệt trong hoạt chất laser rắn.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

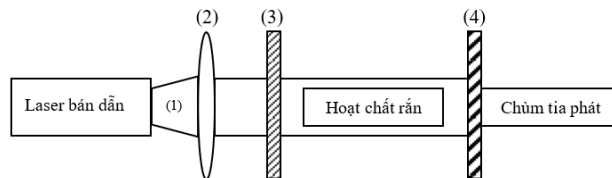
3.1. Cấu hình laser rắn

Từ đặc trưng phổ hấp thụ của các hoạt chất laser rắn, thấy rằng nếu dùng bơm là đèn phóng khí thì hiệu suất rất thấp. Phần lớn năng lượng ánh sáng của đèn (khoảng 75% đối với đèn Xenon) gây ra nhiệt trong hoạt chất, từ đó gây ra các hiệu ứng nhiệt có ảnh hưởng không tốt đến quá trình phát laser [1]. Sự đốt nóng hoạt chất sẽ gây nên nhiều hiệu ứng nhiệt khác nhau: giảm công suất phát, gây bất ổn định công suất, gây bất ổn định cấu trúc chùm tia và thậm chí làm hỏng hoạt chất.

Để tránh được các hiệu ứng nhiệt bất lợi như vậy, trong công nghệ laser người ta tìm các nguồn quang học có phổ trùng với phổ hấp thụ của laser rắn.

Có hai phương pháp bơm cho laser rắn, đó là bơm ngang và bơm dọc. Bơm dọc từ đầu vào buồng cộng hưởng có lợi là năng lượng trong hoạt chất phân bố đều trên tiết diện ngang. Tuy nhiên, hiệu suất bơm không cao vì khó tập trung năng lượng bơm vào hoạt chất. Bên cạnh đó thì năng lượng bơm sẽ giảm dần theo chiều dài hoạt chất.

Đối với các hoạt chất laser rắn có kích thước bé và yêu cầu phát công suất thấp có thể sử dụng một laser bán dẫn có công suất lớn bơm dọc theo chiều dài hoạt chất. Cấu hình laser rắn bơm dọc được trình bày trên Hình 1.



Hình 1. Cấu hình laser rắn bơm dọc [1]

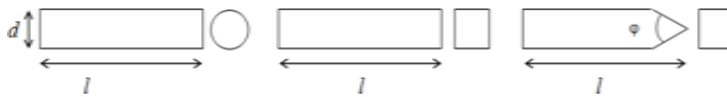
- (1): tia laser bơm (3): gương phản xạ 100% (đối với sóng bơm)
(2): thấu kính (4): gương phản xạ 50%

Chùm tia laser bán dẫn công suất lớn được phân bố lại năng lượng tương đối đều trên tiết diện ngang bằng một hệ quang. Hệ quang sử dụng được thiết kế sao cho vết chùm tia bơm bằng hoặc lớn hơn một ít so với tiết diện ngang của hoạt chất. Vì phân bố chùm tia laser bán dẫn không đều nên thường phải sử dụng tích hợp một thấu kính trụ và một số thấu kính cầu nhằm mục đích tái phân bố năng lượng chùm bơm. Với cấu tạo như vậy, chùm tia bơm có phân bố đều sẽ chiếu vào hoạt chất laser.

3.2. Hoạt chất laser rắn

Hoạt chất của laser rắn thường là điện môi dạng tinh thể hoặc vô định hình có dạng hình trụ tròn. Lớp phản xạ thường được phủ ở ngay đầu thanh, như vậy đầu thanh thường được đánh

bóng và được phủ bằng lớp điện môi đủ để đảm bảo hệ số phản xạ cần thiết cho bước sóng laser.



Hình 2. Hình dạng thanh hoạt chất laser [1]

Đường kính thanh chỉ khoảng vài milimét tới vài centimet. Hoạt chất thường có hai thành phần: chất nền và chất kích hoạt.

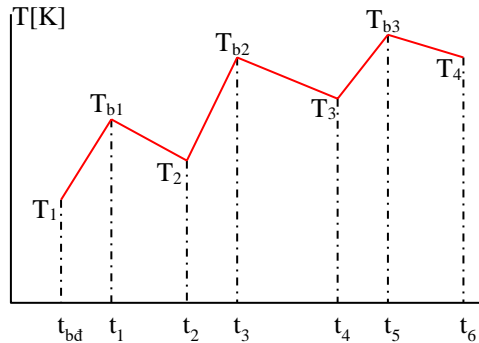
Chất nền là chất cơ bản sẽ không tham gia trực tiếp vào những quá trình tạo bức xạ laser. Chất nền có thể là đơn tinh thể hoặc vô định hình và có chứa các nguyên tử hoặc ion của chất kích hoạt.

Chất kích hoạt thường có tỷ lệ rất nhỏ chỉ khoảng vài phần trăm so với chất nền. Vì vậy tính chất kỹ thuật cơ bản của hoạt chất sẽ do chất nền quyết định. Laser rắn sử dụng hoạt chất là các tinh thể có cấy các ion kim loại đất hiếm. Các tinh thể Alexandrite ($\text{BeAl}_2\text{O}_4\text{-Cr}^{3+}$), Fosterite ($\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Cr}^{4+}$), Saphie ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ti}^{3+}$), YAG- Neodym ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}\text{-Nd}^{3+}$), hấp thụ mạnh vùng phổ từ 400 nm đến 850 nm và bức xạ vùng hồng ngoại gần, từ 700 nm đến 1600 nm [4].

3.3. Quá trình hình thành trường nhiệt trong hoạt chất

Dưới tác động của nguồn bơm các tâm hoạt hấp thụ cộng hưởng một phần năng lượng nguồn bơm, phần còn lại sẽ bị hấp thụ không cộng hưởng của chất nền để dao động nhiệt làm nhiệt độ hoạt chất tăng lên. Năng lượng của nguồn bơm thông thường phân bố không đều trong hoạt chất, đặc biệt trên tiết diện ngang. Điều này dẫn đến xuất hiện gradient nhiệt trong hoạt chất. Sự xuất hiện gradient nhiệt trong hoạt chất sẽ ảnh hưởng đến quá trình làm việc của laser, có thể gây ra nhiều hiệu ứng khác nhau: Giảm công suất phát, gây bất ổn định công suất, gây bất ổn định cấu trúc chùm tia, làm hỏng hoạt chất,...

Trong Hình 3 mô tả quá trình tăng nhiệt trong hoạt chất laser. Một chu kỳ hoạt động của laser gồm hai chu kỳ nhỏ: chu kỳ bơm và chu kỳ làm lạnh (khi đèn bơm dừng).



Hình 3. Quá trình sinh nhiệt trong hoạt chất [3]

Ở thời điểm ban đầu (t_{bd}) nhiệt độ của hoạt chất là T_1 (nhiệt độ ban đầu).

- Trong chu kỳ bơm thứ nhất: $t_b = t_1 - t_{bd}$, nhiệt độ sẽ tăng lên đến T_{b1} . Sau khi dừng bơm, tức là trong chu kỳ làm lạnh, $t_{ll} = t_2 - t_1$, nhiệt độ giảm xuống T_2 .

- Bắt đầu chu kỳ bơm thứ hai: Tại thời điểm t_2 , chu kỳ làm việc thứ nhất kết thúc, bắt đầu chu kỳ thứ hai, tức là bơm quang học hoạt động trở lại, nhiệt độ lại tăng lên T_{b2} , dừng bơm cho đến khi chu kỳ hai kết thúc thì nhiệt độ giảm xuống còn T_3 ($T_3 > T_2$, nghĩa là nhiệt độ thanh hoạt tăng lên).

Như vậy ta thấy, theo thời gian làm việc thì nhiệt độ của hoạt chất laser sẽ tăng lên. Quá trình này lặp lại nhiều lần cho đến một thời điểm, trạng thái nhiệt ổn định, dạng và giá trị trường nhiệt ổn định, gọi là trạng thái tựa ổn định trường nhiệt trong hoạt chất [3].

3.4. Phương trình mô tả năng lượng nhiệt trong hoạt chất laser rắn

Như đã trình bày ở trên, hiệu ứng thấu kính nhiệt sinh ra từ sự dư thừa năng lượng bơm, đó là quá trình hấp thụ không cộng hưởng của chất nền làm tăng mức độ dao động nhiệt, dẫn đến nhiệt độ trong hoạt chất tăng lên. Người ta đã chứng minh rằng phần năng lượng bơm biến thành nhiệt chủ yếu là do sai khác giữa năng lượng photon bơm và năng lượng photon laser, sai khác lượng tử do nhiệt được cho bởi [5]:

$$\delta_q = \frac{v_p - v_L}{v_p} \quad (1)$$

trong đó: v_p là tần số bơm và v_L là tần số phát laser.

Các quá trình quang học xảy ra trong các tâm hoạt bao gồm các chuyển dời kích thích và bức xạ. Ta có thể kích thích các tâm hoạt ở mức năng lượng cơ bản lên một trong các mức năng lượng cao hơn. Nếu chuyển dời tâm hoạt xảy ra giữa các mức năng lượng có khoảng cách đủ hẹp thì tâm hoạt sẽ trở về trạng thái cơ bản, không phát laser mà chỉ xảy ra phát xạ huỳnh quang (chuyển dời không phát xạ). Khi đó δ_q trong phương trình (1) được thay thế bằng δ_{nl} - công suất nhiệt huỳnh quang.

Trong hoạt chất laser rắn cấu hình bơm dọc, phần năng lượng bơm chuyển hóa thành năng lượng nhiệt được cho bởi [6]:

$$p_{heat} = (1 - (1 - \delta_{nl})\gamma) p_{abs} \quad (2)$$

trong đó: p_{heat} là năng lượng nhiệt, p_{abs} là phần năng lượng hấp thụ từ năng lượng bơm, và γ là tham số đặc trưng cho số ion phát xạ (cm^3/s):

$$\gamma(r, z) = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4w\tau^2 r_p(r, z)}}{2w\tau^2 r_p(r, z)} \quad (3)$$

trong đó: τ là độ rộng xung, w là hệ số chuyển năng lượng và $r_p(r, z)$ là bán kính thanh hoạt chất.

Thay (3) vào (2) và tích phân theo toàn bộ thể tích chùm bơm ta sẽ tìm được phần năng lượng bơm chuyển hóa thành năng lượng nhiệt trong hoạt chất. Sử dụng chùm bơm có phân bố Gauss, giả sử toàn bộ năng lượng chùm bơm được hấp thụ ($p_{abs} = p$) thì phần năng lượng bơm chuyển hóa thành nhiệt được cho bởi [6]:

$$p_{heat} = p + \frac{(1 - \delta_{nl})8}{\beta} \left\{ 1 - \sqrt{\beta + 1} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{\beta + 1}}{2} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 + \frac{1}{4} \ln(2 + 2\sqrt{\beta + 1}) \right) + \frac{\ln(2)}{2} \left(\ln(\sqrt{\beta + 1} - 1) - \ln\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) + \frac{1}{2} \int_{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\beta + 1}}^1 \frac{\ln(t)}{1 - t} dt \right\} \quad (4)$$

trong đó [6, 7]:

$$\beta = \frac{8wp\alpha_p\tau^2}{\pi\omega_p^2 h\nu_p} \quad (5)$$

với: p là năng lượng bơm, α_p là hệ số hấp thụ, ν_p là tần số bơm, ω_p là bán kính mặt thắt

chùm bơm và h là hằng số Planck.

Từ (4) và (5) ta thấy phần năng lượng bơm chuyển hóa thành năng lượng nhiệt, hay nói cách khác hệ số biến đổi quang nhiệt (p_{heat}/p) phụ thuộc vào nhiều tham số, trong đó có độ rộng xung bơm. Ảnh hưởng của tham số này đến hệ số biến đổi quang nhiệt như thế nào, chúng ta sẽ khảo sát sau đây.

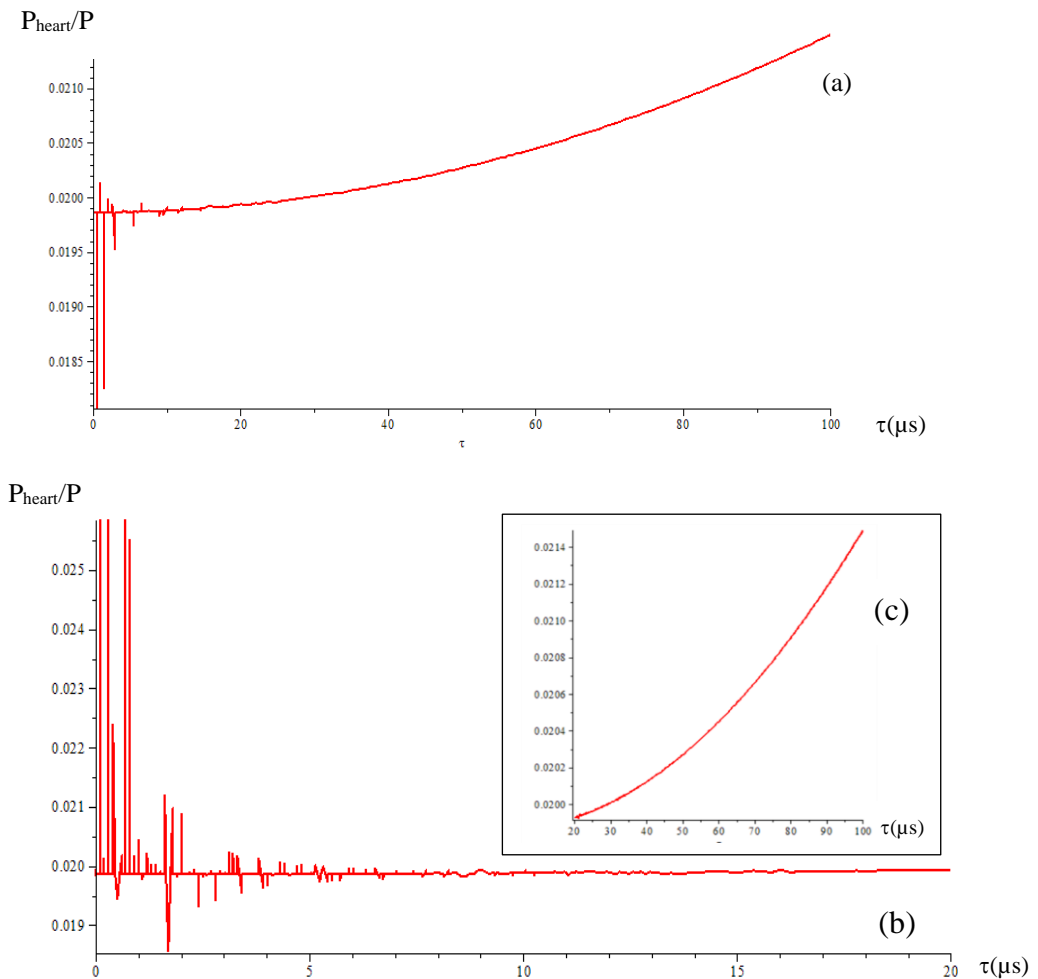
3.5. Ảnh hưởng của độ rộng xung bơm lên biến đổi quang nhiệt trong hoạt chất

Xét cho trường hợp laser rắn hoạt chất Nd:YVO₄ (hàm lượng Nd là 1%) bơm dọc bằng chùm laser xung Gauss, sử dụng các tham số:

$p = 1W, \alpha_p = 3000m^{-1}, \tau = 100\mu s, \lambda_p = 1064nm, W = 3.5 \times 10^{-22}m^3s^{-1}$ [8]. Kết quả khảo sát

ảnh hưởng của độ rộng xung bơm (τ) đến hệ số biến đổi quang nhiệt được mô tả như Hình 4.

Từ kết quả mô phỏng ta thấy, khi độ rộng xung nhỏ (trong khoảng $\tau < 20\mu s$ - Hình 4b) thì hệ số biến đổi quang nhiệt tăng, giảm, biến thiên liên tục. Rõ ràng trong trường hợp này thì bên trong hoạt chất laser sẽ xảy ra nhiều quá trình phi tuyến phức tạp. Điều đó sẽ không tốt cho quá trình hoạt động của laser.



Hình 4. Ảnh hưởng của độ rộng xung đến hệ số biến đổi quang nhiệt

Nếu độ rộng xung lớn hơn $20\mu s$ - Hình 4c, lúc này hệ số biến đổi quang nhiệt sẽ tăng khi độ rộng xung tăng. Điều này là phù hợp vì khi độ rộng xung lớn, năng lượng dư thừa không

kip suy hao mà nó sẽ "chồng lán" nhau sau mỗi lần bom, như đã trình bày ở mục 3.3. Đây là nguyên nhân làm cho năng lượng nhiệt trong hoạt chất tăng lên. Kết quả là có thể gây ra nhiều hiệu ứng bất lợi trong quá trình hoạt động của laser, như đã đề cập ở trên.

4. KẾT LUẬN

Trong quá trình hoạt động của laser, đồng thời với quá trình này là quá trình sinh nhiệt trong hoạt chất và kết quả là có thể xảy ra các hiệu ứng bất lợi cho quá trình hoạt động của laser. Bằng cách dẫn ra hệ số biến đổi quang nhiệt, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của độ rộng xung bơm đến phân bố biến đổi quang nhiệt trong hoạt chất. Kết quả cho thấy, khi độ rộng xung nhỏ thì hệ số biến đổi quang nhiệt biến thiên liên tục (tăng, giảm). Rõ ràng trong trường hợp này thì bên trong hoạt chất laser sẽ xảy ra nhiều quá trình phi tuyến phức tạp. Đây là nguyên nhân dẫn đến những ảnh hưởng không tốt đến quá trình hoạt động của laser.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Hồ Quang Quý - Laser rắn công nghệ và ứng dụng, NXB Đại học Quốc gia Hà Nội, 2006.
2. Mai Văn Lưu - Ảnh hưởng của chùm laser xung Gauss lên quá trình quang phân bố của môi trường bị kích thích, Luận án Tiến sĩ Vật lý, Đại học Vinh, 2010.
3. Hồ Quang Quý, Vũ Ngọc Sáu - Laser bước sóng thay đổi và ứng dụng, NXB Đại học Quốc gia Hà Nội, 2005.
4. Trần Đức Hân - Cơ sở kỹ thuật laser, NXB Giáo dục, 2005.
5. Nadagran H. and Sabaian M. - Pulsed pump: Thermal effects in solid lasers under super-Gaussian pulses, *Pramana - Journal of Physics* **67** (6) (2006) 1119-1128.
6. Hencharl Johan Strauss - Thermo-optical effects in high-power end-pumped vanadate lasers, Thesis of Physics, Stellenbosch University, 2010.
7. Hardman P. J., Clarkson W. A., Friel G. J., Pollnau M., and Hanna D.C. - Energy-transfer upconversion and thermal lensing in high-power end-pumped Nd:YLF laser crystals, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **35** (4) (1999) 647-655.
8. Xiang Z., Wang D., Pan S., Dong Y., Zhao Z., Li T., Ge J., Liu C., and Chen J. - Beam quality improvement by gain guiding effect in end-pumped Nd:YVO₄ laser amplifiers, *Optics Express* **19** (21) (2011) 21060-21073.

ABSTRACT

INFLUENCE OF PULSE DURATION ON OPTOTHERMAL COEFFICIENT OF LONGITUDINAL LASER PUMPED SOLID LASER

Mai Van Luu^{1*}, Nguyen Thanh Van², Nguyen Thuy Trang³

¹Hanoi Open University

²Nam Ky Khoi Nghia High School, Chau Thanh District, Tien Giang Province

³Duc Hoa High School, Duc Hoa District, Long An Province

*Email: luumv@hou.edu.vn

In this work, the configuration of longitudinal semiconductor laser pumped solid laser and the optothermal coefficient are presented. The influence of pulse duration on the optothermal coefficient is numerically observed and discussed for the Nd:YVO₄ laser.

Keywords: Solid-state laser, end-pumped, pulse duration, optothermal transfer.