



### Quang Phi Tuyến C a Chùm Bessel

*Tóm tắt:* Chúng tôi đã khảo sát tính chất nhân đôi tần số c a chùm sáng có biên độ ngang là hàm Bessel bậc không  $J_0(r)$  (chùm Bessel) trong tinh thể KDP. Góc hợp pha thực nghiệm khác với góc hợp pha tính toán lý thuyết. Điều này chứng tỏ rằng trong những điều kiện nào đó, chùm Bessel có thể xem như chùm sáng có bậc sóng điều chế. Tính chất này sẽ có nhiều ứng dụng trong lĩnh vực quang phi tuyến.

Hiện nay, chùm sáng có phân bố ngang theo phương ngang được mô tả bằng hàm Bessel bậc 0 loại I  $J_0(r)$  đã thu hút sự chú ý quan tâm. Durnin [1] đã phát hiện rằng những chùm này không mở rộng mà duy trì chính xác nó trong quá trình quang học. Bởi vì nhìn bề ngoài, điều này dường như vi phạm nguyên lý bất định, thu được “chùm không nhiễu xạ” thực sự và được phân bố. Tuy nhiên, điều này, chúng tôi sẽ dùng một thuật ngữ mang tính kỹ thuật (thích hợp hơn) là “chùm Bessel.”

Kết quả khám phá thực nghiệm ưu tiên về chùm Bessel [2], nhiều ứng dụng tiềm năng đã được đề cập [3,4], tất cả đều dựa trên tính chất không mở rộng của chúng. **Những đặc điểm nào đó của tính chất sóng của chùm Bessel  $\beta = (k^2 - \alpha^2)^{1/2}$  khác với sóng c a sóng phẳng  $k = 2\pi/\lambda$ .** Nói cách khác, “bậc sóng” của chùm Bessel được theo dõi quang học, nên có các đặc tính khác biệt với sóng c a chùm thông thường cùng tần số (ví dụ, chùm Gauss). Trong bài báo này, chúng tôi muốn chứng minh rằng những đặc tính này sẽ trở thành đặc tính của chùm Bessel về môi trường phi tuyến quang học.

Trong thực tế, chùm Bessel có thể tạo ra các đặc tính khá thú vị, những đặc tính này đã được khảo sát hiệu quả quang phi tuyến liên quan đến hiệu ứng chùm beam có các đặc tính cao. Turunen, Vasara, và Friberg [5] đã tạo ra một thí nghiệm ánh sáng c g i là bản in chuyển pha liên quan ánh sáng chiếu qua nó thành chùm Bessel. Nó bao gồm một mảng các vòng tròn đồng tâm, giống như các bản in Fresnel, những chênh lệch bán kính giữa các vòng tròn kế tiếp nhau không đồng đều. Vì thế nó có thể xem như một cách thể hiện nhiễu xạ tròn. Nhiễu xạ bậc nhất, nó thu được một nón sóng phẳng khi chiếu sáng về chùm sáng song song. Vân giao thoa xuất hiện trong nón này có thể xem như chùm Bessel [1]. Phân bố tần số của nó có thể tính bằng lý thuyết nhiễu xạ của Kirchoff [6], theo phép gần đúng trường sóng phẳng:

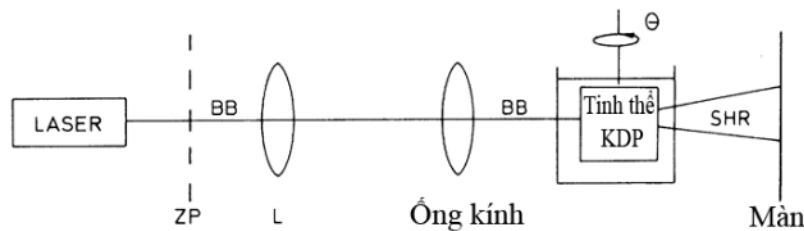
$$E(r, z) = J_0(\alpha r) e^{-i(k^2 - \alpha^2)^{1/2} z} \sqrt{z} \tag{1}$$

( $r$  là khoảng cách tính từ trục  $z$ , trục  $z$  dọc theo trục quang học). Góc kính của chùm c ng nh h ng s truy n c a nó c xác nh b i tham s  $\alpha$ , nó chỉ phụ thuộc vào chênh lệch bán kính của các vòng tròn trên bản in  $\alpha = 2\pi/g$ . Trong thí nghiệm của chúng ta, một chuỗi gồm 300 các vòng tròn đồng tâm được vẽ bằng máy tính, sau đó được in trên máy in laser phân giải cao (2500 dpi) và rồi được thu nhận. Bản in thu được theo phương pháp này có góc kính khoảng 1 cm và chênh lệch bán kính  $g = 17.5\mu\text{m}$ . Bằng cách chiếu sáng bản in này bằng một laser công suất Q Nd:YAG

( $\lambda = 1064nm$ ; năng lượng xung  $\approx 1mJ$ ), chùm Bessel có trục và các mô tả như trong hình 1. Thấu kính L và ống kính thu phóng Z có trục quang học trùng nhau. Do đó, nếu sóng đi vào L là sóng phẳng thì sóng thoát ra từ ống kính thu phóng cũng là sóng phẳng. Vì vậy, nón sóng phẳng có trục và bán kính của nó chuyển thành nón sóng phẳng khác phía sau ống kính thu phóng, với tính chất quan trọng là góc nón có thể thay đổi liên tục theo sự thay đổi tiêu cự của ống kính thu phóng. Vì thế, chùm Bessel có trục và bán kính của nó chuyển thành chùm Bessel khác qua sự kết hợp của L và ống kính thu phóng. Hằng số truyền  $\beta$  của nó biến đổi liên tục tuân theo hình thức:

$$\beta = k \left[ 1 - (\alpha f_L / k f_Z)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

trong đó  $f_L$  và  $f_Z$  lần lượt là tiêu cự của thấu kính L và ống kính thu phóng Z.



H1. Bố trí thí nghiệm. ZP: bản đối, được chiếu bởi chùm Laser mở rộng (Nd: YAG công tắc Q; khoảng 1 mJ trên một xung). BB: chùm Bessel. L: thấu kính. Ống kính: ống kính thu phóng có mặt phẳng tiêu trùng với mặt phẳng tiêu của thấu kính L. SHR: bức xạ hài bậc hai. Tinh thể KDP (dài 15 mm) có thể quay được đặt trong một cái chậu cố định. Do đó loại trừ được sự méo của chùm Bessel do khúc xạ trên bề mặt tinh thể bị nghiêng.

Bây giờ chúng ta hãy xét những gì mà chúng ta đã tiên đoán về hành vi nhân đôi tần số của chùm Bessel trong vật lý phi tuyến. Bởi vì sự phát sóng hài bậc II là quá trình 2 photon, vectơ sóng của photon hài bậc II bằng tổng vectơ của các vectơ sóng của hai photon tới, theo nguyên lý bảo toàn năng lượng. Như đã đề cập, chùm Bessel có thể được xem như sự chồng chập của vô số sóng phẳng với vectơ sóng của chúng nằm trong mặt nón trong không gian  $k$ . Dĩ nhiên, tất cả các cặp photon có thành phần xuyên tâm của vectơ sóng ngược nhau đóng góp vào SHG trên trục quang học, với sóng bậc  $2\beta$ . Do đó, cùng với nón phân cực hài bậc hai do các sóng phẳng riêng biệt, còn có một sóng phân cực hài bậc hai mà truyền theo hướng z, với sóng khác giá trị thông thường  $2k$ . Hơn nữa, bởi vì các thành phần của phân cực hài bậc hai khác biệt rõ rệt nhau trên trục quang học, chùm Bessel hành vi như một chùm chuyển từ trục tới với sóng bậc hai.

Lúc này, chúng ta nên đề cập đến mối quan hệ giữa thí nghiệm của chúng ta và kỹ thuật SHG không cộng tuyến được phát triển gần đây [7], đó là hai chùm beam được chồng lên tại một góc nào đó mà đi vào kính phân cực vào. Sự khác nhau quan trọng là: trong trường hợp của chúng ta, SHG xảy ra chỉ ở trục quang học.

ó c ng t giá tr c c i. Tính ch t quang h c c tr ng c a chùm Bessel là h qu c a s k th p c a s sóng b t th ng trên tr c và phân b c ng không gian c b i t.

Nh ã bi t, SHG hi u qu ch x y ra khi v n t c pha c a các b c x c b n và các b c x hài trùng nhau, ngh a là t i n i giao nhau c a t i t di n b m t chi t su t (phân b góc) c a b c x c b n và b c x hài [8]. Trong tình th thích h p (KDP trong tr ng h p c a chúng ta), giao i m nh th t n t i t i m t góc c b i t  $\theta_{PM}^0$  ( i v i tr c tinh th ), c g i là góc h p pha. B i vì s sóng c a phân c c hài b c hai trên tr c do chùm Bessel khác v i s sóng c a chùm Gauss, nên v n t c pha c a nó c ng v y, và chúng ta tiên oán s quan sát c m t góc h p pha  $\theta_{PM}$  khác v i góc h p pha thông th ng  $\theta_{PM}^0$ . H n n a, b i vì chúng ta có th i u ch nh h ng s truy n, s h p pha t i các góc khác nhau có th x y ra (ph thu c vào s i u ch nh).

i u này c b i u di n trong hình 2. ây,

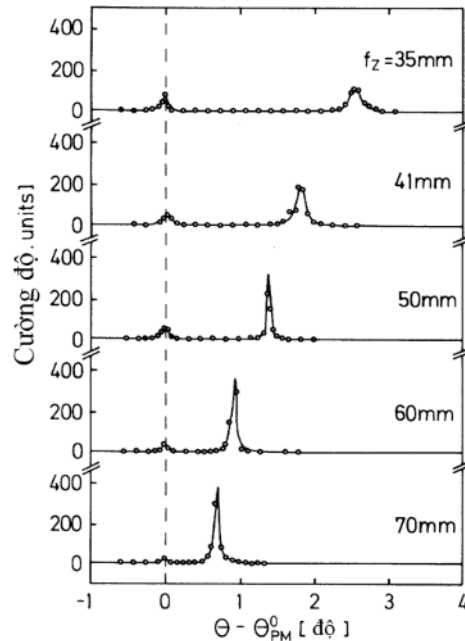
c ng c a hài b c hai c o trên tr c quang h c phía sau tinh th c v nh m t hàm theo v trí góc  $\theta$  c a tinh th .

Có hai peak c ng . Peak bên ph i ng v i hài b c hai t chùm Bessel; peak bên trái (t i  $\theta = \theta_{PM}^0$ ) ng v i quá trình SHG c a chùm sáng song song truy n qua b n i mà không b nhi u x . V trí c a peak bên ph i ph thu c vào tiêu c c a c a ng kính thu phóng và vì th ph thu c vào h ng s truy n  $\beta$  c a chùm Bessel, vì th nó minh h a kh n ng có th i u ch nh c c a góc h p pha.

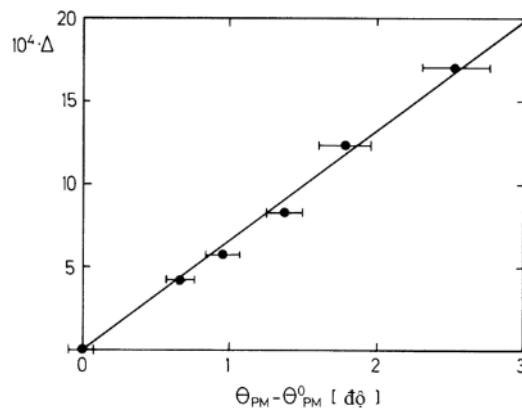
Kho ng i u ch nh b g i i h n ch y u b i lo i ng kính thu phóng trong thí nghi m c a chúng ta.

Hình 3 b i u di n th c a i l ng  $\Delta := (k - \beta)/k$ ,

c tính theo ph ng trình (2), nh m t hàm theo góc  $\theta_{PM}$  c a tinh th KDP t i ó SHG h p pha t chùm Bessel xu t hi n. Khi thỏa mãn i u ki n h p pha,  $\Delta$  t l v i chênh l ch chi t su t c a sóng c b n và sóng hài. Do ó, d li u trong hình 3 cho th y m t



HÌNH 2. Cường độ SHG như một hàm theo độ lệch so với góc hợp pha tiêu chuẩn  $\theta_{PM}^0$ , đối với các tiêu cự khác nhau của ống kính thu phóng  $f_z$ . Các đường liền nét nối liền các chấm để dễ thấy.



HÌNH 3. Đại lượng  $\Delta := (k - \beta)/k$  tại đó điều kiện hợp pha xuất hiện như một hàm theo vị trí góc của tinh thể. Các thanh sai số chỉ độ rộng của các peak trong hình 2. Hệ số góc của đường thẳng là  $(6.6 \pm 0.6) \times 10^{-4} \text{ deg}^{-1}$ .

“a th” của l ng chỉ t trong vùng lân c n c a góc h p pha tiêu chu n. ng th ng bi u di n m t bình ph ng t i thi u kh p d li u và có h s góc  $(6.6 \pm 0.6) \times 10^{-4}$   $^{-1}$ . V m t lí thuy t, s thay i tính l ng chỉ t g n góc h p pha có th c tính t chỉ t su t th ng và b t th ng c a tinh th [8]. K t qu thu c  $(5.9 \pm 0.5) \times 10^{-4}$   $^{-1}$  phù h p v i giá tr th c nghi m.

Kh n ng có th thay i s sóng có vài ng d ng ti m n ng trong l nh v c quang phi tuy n, b t c âu có ng ch m n v n h p pha. Ch ng h n, trong các v t li u quang phi tuy n m i, các tham s h p pha thông th ng (nhĩ t và góc t i) không ph i lúc nào c ng phù h p v i lí thuy t, vì v y các tham s i u ch nh m i r t áng quan tâm. H n n a, vì c th c hi n chuy n i gi m tham s trong các v t li u không h p pha g i c là kh d [8]. Nh ng v t li u y h a h n trong s n ày là GaAs và methylnitroaniline có phi tuy n l n h n vài b c so v i LiNbO<sub>3</sub> [9,10]. Trong các thí nghi m tán x Raman c ng b c, s h p pha c a sóng phân c c phân t c a b c x h ng ngo i có th t c, mang l i m t ngu n b c x h ng ngo i c ng m nh m i. Hi n t i, chúng tôi ang th c hi n các thí nghi m khám phá nh ng kh n ng n ày.

Bây gi , chúng ta hãy th o lu n phân b c ng tr ng xa c a b c x hài b c hai. Biên d ng theo ph ng ngang c a nó có th thu c b ng phép bi n i Fourier c a phân c c hài b c hai trong tinh th ,  $P^{(2)}(\mathbf{r})$ . V i

$$E(r, z) \propto J_0(\alpha r) e^{-i(k^2 - \alpha^2)^{1/2} z} \quad (3)$$

Và  $P^{(2)} = \chi^{(2)} E^2$  chúng ta thu c, trong không gian  $k$ ,

$$P^{(2)}(k_r, k_z) \propto \chi^{(2)} F\{J_0^2(\alpha r)\} \delta(k_z - 2\beta), \quad (4)$$

ây  $F\{\dots\}$  bi u di n bi n i Fourier hai chi u và  $\delta(\dots)$  là hàm  $\delta$  Dirac. S h p pha s xu t hi n khi có s xen ph c a  $P^{(2)}$  và t i t di n b m t chỉ t su t c a sóng hài b c II. Hàm  $\delta$  cho chúng ta bi t r ng h p pha ch x y ra khi có s giao nhau gi a t i t di n b m t chỉ t su t này v i m t ph ng c nh ngh a b i  $k_z = 2\beta$ . T p h p các vecto  $k$  thu c giao i m nh th hình thành nên m t nón mà chúng ta s g i là nón Cherenkov, theo các bài báo khác trong l nh v c này [11,12]. Bi n i Fourier c a  $J_0^2(\alpha r)$  nh ã bi t b ng:

$$F\{J_0^2(\alpha r)\} = \frac{2}{|k_r| (4\alpha^2 - k_r^2)^{1/2}} \quad (5)$$

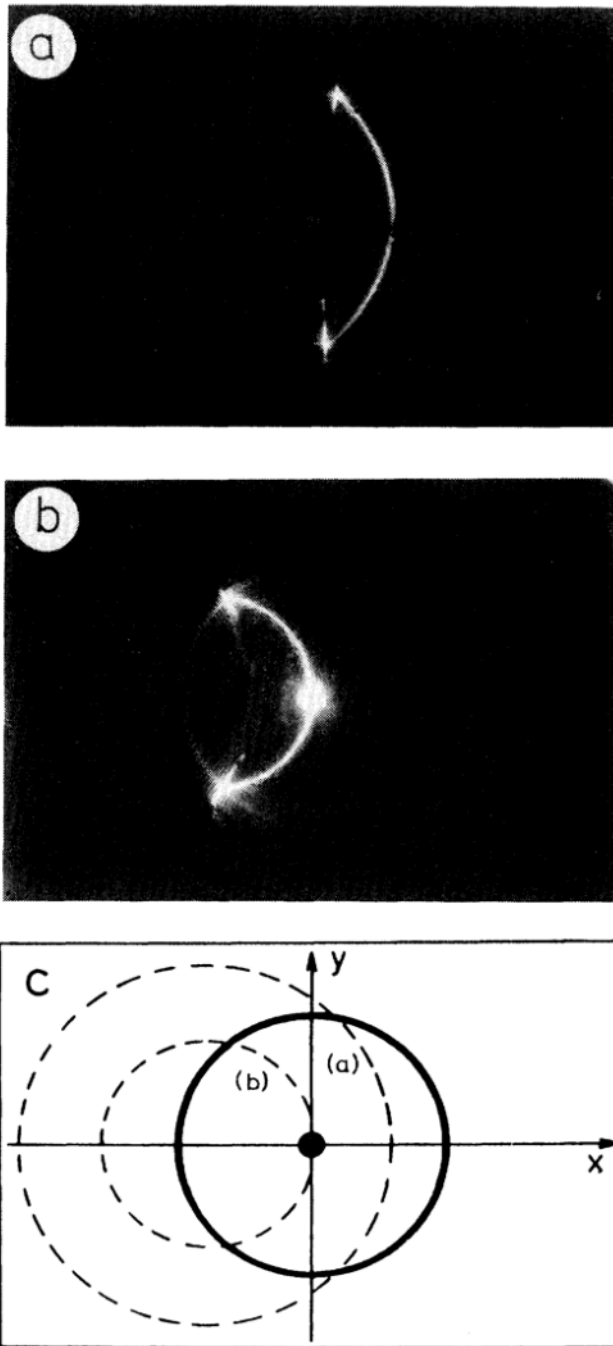
Và t gi tr i s c g i là hàm hi u su t. S t o sóng hài b c II s x y ra khi nón Cherenkov giao v i m t trong s các c c c a hàm hi u su t. C c m nh t i  $|k_r| = 0$  t ng ng v i SHG đ c theo tr c quang h c v i s sóng  $2\beta$  là c tr ng c a chùm Bessel. C c y u h n đ c theo ng tròn  $|k_r| = 2\alpha$  t ng ng v i SHG t các sóng ph ng riêng bi t trong nón.

Hình 4 là nh ch p c a phân b c ng tr ng xa i v i  $\theta \neq \theta_{PM}$  [hình 4a] và i v i  $\theta = \theta_{PM}$  [hình 4b]. Trong hình 4c, qu tích các c c c a  $F\{J_0^2(\alpha r)\}$  c v cùng t l . Các ng tròn nét t (a) và (b) ch các nón Cherenkov t ng ng v i các vòng tròn m trong hình 4a và 4b. th c a vài nón Cherenkov i v i các tham s hi u

Liên hệ và trao đổi: thanhnam1910\_2006@yahoo.com

---

chính khác nhau sẽ mang lại những kết quả khác nhau. Các bạn hãy thử nghiệm và so sánh kết quả nhé.



HÌNH 4. Phân bố cường độ trường xa của bức xạ hài bậc hai. (a) Không hợp pha; phần của nón Cherenkov có dạng một cung tròn. (b) Hợp pha; nón Cherenkov giao với trục quang học. (c) Đồ thị của quỹ tích của các cực của hàm hiệu suất (đường liền nét và chấm trung tâm). Cực mạnh nhất nằm trên trục quang học. Các đường tròn nét đứt biểu diễn các nón Cherenkov từ (a) và (b).

Chúng ta thấy rằng trong thí nghiệm của hình 4b biểu diễn sự tồn tại của sóng hài bậc II theo hướng trục quang học. Nó xuất hiện khi nó Cherenkov gặp các trung tâm của chùm hiu su t. phân kỳ của chùm trung tâm này khoảng 1 mrad. Chú ý rằng chùm này không tính đến sự chênh lệch của các góc của SHG trên trục và ngoài trục. Trong khi SHG trên trục có thể có độ đồng đều (hình 2), các góc của nón Cherenkov đã được ghi nhận phát hiện của chúng ta.

Khi hướng sự truyền của chùm Bessel  $\beta$  và góc tinh thể  $\theta$  không thỏa mãn điều kiện hình học, như trong hình 4a, nón Cherenkov thì các trung tâm và sự tồn tại của sóng hài bậc II không xuất hiện. Giao diện với các tia  $|k_r| = 2\alpha$  tương ứng với SHG của các sóng phẳng riêng biệt và rõ ràng có thể xem như các tia, như trong hình 4b. Tuy nhiên, tia phản xạ này, hiu su t chuyển đổi ngược lại vì các tia này không mang các tia  $|k_r| = 0$ .

Tóm lại, chúng ta minh chứng rằng có thể điều chỉnh các điều kiện hình học của sự tồn tại của sóng hài bậc II của chùm Bessel, thí nghiệm của chúng tôi chứng tỏ rằng trong những điều kiện nào đó, chùm Bessel có thể xem như chùm sáng với các sóng có thể điều chỉnh được. Kết quả này không chỉ là một ví dụ quan trọng mà là một bước đầu tiên trong các bài toán hình học trong tương tác phi tuyến của hai sóng ánh sáng khác nhau (nghĩa là, như những minh chứng trong lĩnh vực quang phi tuyến), chùm Bessel sẽ ý nghĩa tham gia điều chỉnh thêm vào.

- [1] J. Durnin, J. Opt. Soc. Am. A **4**, 651 (1987).
- [2] J. Durnin, J. J. Miceli, and J. H. Eberly, Phys. Rev. Lett. **58**, 1499 (1987).
- [3] G. Häusler and W. Heckel, Appl. Opt. **27**, 5165 (1988).
- [4] J. Lu and J. F. Greenleaf, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, and Freq. Control **39**, 19 (1992), and references therein.
- [5] J. Turunen, A. Vasara, and A. T. Friberg, Appl. Opt. **27**, 3959 (1988).
- [6] A. Vasara, J. Turunen, and A. T. Friberg, J. Opt. Soc. Am. **6**, 1748 (1989).
- [7] A. Reichert and K. Betzeler, “Characterization of Electro-optic Crystals by Non-Collinear Frequency Doubling” (to be published).
- [8] This process can be understood as the inverse of so-called Cherenkov SHG; see Ref. [11].
- [9] F. Zernike and J. E. Midwinter, *Applied Nonlinear Optics* (Wiley, New York, 1973).
- [10] M. Kiguchi, M. Kato, M. Okunaka, and Y. Taniguchi, Appl. Phys. Lett. **60**, 1933 (1992).
- [11] A. Zembrod, H. Puell, and J. A. Gjorndaine, Optoelectron. Lett. **1**, 64 (1969).
- [12] P. K. Tien, R. Ulrich, and R. J. Martin, Appl. Phys. Lett. **17**, 447 (1970).