

Bazı Tek ve Çift Eksenli Nonlineer Kristallerin Optik Özellikleri *

İbrahim KARABULUT¹, Haluk ŞAFAK, Ö. Faruk YÜKSEL

Selçuk Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü Kampus KONYA

Özet: Bu çalışmada, Optiksel Parametrik Salınım (OPO) sistemlerinde kullanılan bazı tek ve çift eksenli kristallerin temel fiziksel ve optik özellikleri incelenmiştir. Yüksek dönüşüm kazancına sahip koherent ışık elde etmek için gereken koşullar tartışılmıştır. Ayrıca, faz uyum koşullarının kristallerin çeşitli parametreleriyle değişimleri incelenmiştir. Nümerik hesaplamalar KDP ve KTP kristalleri için gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nonlineer kristaller, faz uyumu, fark frekans üretimi

The optical properties of some uniaxial and biaxial nonlinear crystals

Abstract: In this study, fundamental physical and optical properties of some uniaxial and biaxial crystals used in Optical Parametric Oscillators (OPO) systems have been investigated. To obtain coherent light with high conversion gain, the required conditions are discussed. Moreover, the variations of phase matching conditions with several parameters of crystals have been investigated. Numerical calculations have been performed for KDP and KTP crystals.

Key Words: Nonlinear crystals, phase matching, difference frequency generation

Giriş

Bazı araştırma alanlarında (örneğin spektroskopi, yarı iletken analiz teknikleri, fotofizik ve uzaktan algılama) yüksek enerjili ya da yüksek güce sahip ayarlanabilir koherent ışık kaynaklarına ihtiyaç vardır. Bu amaçla, teknolojinin geldiği noktada yaygın olarak boya lazerler kullanılmaktadır. Ancak gerek bu lazerlerdeki zehirleyici malzemelerin zararlı etkileri, gerekse zamanla bozulmaya uğramalarından dolayı sürekli boya değiştirmenin gerekmesi bu tür lazer kaynaklarının başlıca eksikliklerini oluşturmaktadır. Malzeme bilimindeki ve lazer teknolojisinde son yıllarda meydana gelen hızlı gelişmeler, koherent ışık kaynaklarında değişik nonlineer kristallerin kullanımını oldukça yaygınlaştırmıştır. Nonlineer süreçlerin geçerli olduğu bu kristallerdeki temel fiziksel süreçler yaklaşık 50 yıldır yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Bu tür kristallerin yüksek güce ve verime sahip koherent ışık kaynaklarında etkin şekilde kullanılması için çalışmalar devam etmektedir.

Nonlineer kristaller yaygın biçimde lazer teknolojisinde geniş band aralığında ve dar bir ayarlama bölgesine sahip koherent ışık kaynaklarında önemli uygulama alanı bulmuştur. Örneğin telekomünikasyon alanında 1,3 mikrometre ile 1,55 mikrometre aralığında band genişliğine sahip kaynaklara ihtiyaç vardır. Benzer şekilde yarıiletken heteroeklemlerin zaman çözünürlüklü spektroskopik araştırmalarında yaklaşık 1,2 mikrometrede femtosaniyelik (fs) lazer pulsları gerekmektedir. Diğer taraftan yüksek tekrarlama hızına sahip işlemler geniş sinyal

* Bu makale yüksek lisans tezinin bir bölümüdür.

¹ E mail: ikarabulut@selcuk.edu.tr

gürültü oranlarının elde edilmesine yol açar. Yüksek tekrarlama hızları aynı zamanda haberleşme uygulamalarında yüksek veri iletim hızı anlamına gelmektedir. Nonlineer kristallerin kullanıldığı optik parametrik osilatörler bu belirtilen uygulamaların gerçekleştirilmesinde yaygın şekilde kullanılmaya başlamıştır [1-25]. Her ne kadar çok geniş bir uygulama alanına sahip olsa da bu tür kristaller üzerindeki araştırmalar devam etmekte, değişik uygulama imkanlarının gerçekleştirilmesi üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Tüm bunlara rağmen, bu tip kristaller üzerinde ülkemizde henüz kapsamlı bir çalışma mevcut değildir.

Frekans dönüşüm süreçleri, toplam frekans üretimi (SFG) ve fark frekans üretimi (DFG) şeklinde frekans katlamayı içerir [6]. Toplam frekans üretiminde, iki düşük enerjili foton birleşerek yüksek enerjili bir foton oluşturur. Fark frekans üretiminde ise, iki yüksek enerjili foton birleşerek düşük enerjili bir foton oluşturur. Optiksel parametrik üretim (OPG), toplam frekans üretiminin tersi bir süreçtir. Yüksek frekanslı bir foton (pompalama dalgaboyu, λ_p) iki düşük frekanslı fotona (sinyal λ_s ve idler dalgaboyu λ_i) ayırır. Optiksel Parametrik Salınım (OPO) sistemleri, geniş ayarlanabilir eşığe sahip koherent radyasyon üretmek için mükemmel bir kaynaktır.

Yukarıda bahsedilen sistemlerde yüksek dönüşüm verimi elde etmek için gelen demet ve üretilen demetin faz vektörleri uyum sağlamalıdır. Bu koşul "faz uyumu" olarak bilinir. Faz uyumu açılı değiştirilerek, sıcaklık ayarlanarak ya da değişik metotlarla sağlanabilir. Faz uyumu çıkan foton çiftlerinin doğrultusuna bağlı olarak ikiye ayrılır. İlki her bir fotonun farklı doğrultularda yayıldığı düzlemsel olmayan faz uyumudur. İkinci faz uyum durumunda ise gelen ve çıkış foton çifti aynı doğrultuda yayılır. Bu durumda düzlemsel faz uyumu olarak adlandırılır.

Bu çalışmada, OPO sistemlerinde kullanılan tek ve çift eksenli nonlineer kristallerin temel fiziksel ve optik özellikleri araştırılacaktır. Yüksek verimli koherent ışık elde edilmesi için bu kristallerin ne tür koşullarda kullanılması gerektiği incelenecek ve fiziksel özelliklerinin değişik parametre değerleri için nasıl değiştiği modelleneyecektir. Optik parametrik sistemlerde kullanılan kristal sayısı oldukça fazladır. Ancak bunlardan en yaygın biçimde kullanılan KDP ve KTP kristalleri üzerinde durulacaktır.

Materyal ve Metot

Tek ve çift eksenli kristallerde dispersiyon bağıntıları ve faz uyumu özelliklerinin incelenmesi oldukça önemlidir. Pompalama fotonunun, nonlineer optiksel ortamda etkili bir biçimde daha düşük enerjili sinyal ve idler foton çiftlerine ayrılması olayına parametrik aşağı dönüşüm (*parametric down conversion*) adı verilir. Pompalama, sinyal ve idler dalgalarının aşağı dönüşüm etkileşmesinin hesabı, yaygın biçimde faz uyumu olarak adlandırılan enerji ve momentum korunumunun kullanımını gerektirir. Enerjinin korunumu [5],

$$W_{pompa} = W_{sin,yal} + W_{idler} \quad (1)$$

ifadesiyle tanımlanır. Bu ifadedeki W_{pompa} gelen foton frekansı, $W_{sin,yal}$ ve W_{idler} ise aşağı dönüştürülmüş foton frekanslarıdır. Aşağı dönüşüm süreci için momentum korunumu ifadesi

$$\hat{k}_{pompa} = \hat{k}_{sin,yal} + \hat{k}_{idler} \quad (2)$$

ile tanımlanır. \hat{k}_{pompa} , $\hat{k}_{sin,yal}$ ve \hat{k}_{idler} sırasıyla pompalama, sinyal ve idler dalga vektörleridir.

Tek eksenli kristallerde, ışığın kutuplanma durumundan bağımsız olarak aynı hıza sahip olduğu bir doğrultu vardır ve bu doğrultu optik eksen olarak adlandırılır. Ayrıca tek eksenli kristaller iki farklı kırılma indisine sahiptir. Tek eksenli bir kristalde optik eksen boyunca ışık yayılması, ışığın kutuplanma durumundan bağımsızdır ve elektrik alan bileşeni her yerde optik eksene diktir. Böylesi bir ışık dalgası normal (ordinary) yada o dalgası olarak adlandırılır. Bu duruma karşılık gelen kırılma indisinde normal kırılma indisi (n_o) denir. Optik eksene paralel elektrik alan bileşenine sahip ışık dalgasında anormal (extraordinary) yada e dalgası olarak adlandırılır. Bu durumdaki kırılma indisinde n_e ile gösterilir ve anormal kırılma indisi denir. Tek eksenli kristaller kırılma indislerinin karşılaştırılmasına göre pozitif ve negatif tek eksenli kristaller olmak üzere ikiye ayrılırlar [6]. Pozitif tek eksenli kristaller ,

$$1 - \frac{n_o}{n_e} > 0 \quad (3)$$

Ifadesine göre negatif tek eksenli kristaller ise,

$$1 - \frac{n_o}{n_e} < 0 \quad (4)$$

ifadesine göre tanımlanır. Çift eksenli kristaller, tek eksenli kristallerden farklı olarak iki optik eksene ve üç farklı kırılma indisine sahiptir. Küresel koordinatlar kullanılarak, Denk. (2)'deki pompalama dalga vektörü kristalin ana dielektrik eksenleri \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} ile θ_{pompa} kutupsal ve ϕ_{pompa} azimutal açıları cinsinden ifade edilebilir.

Laboratuvar gözlem çerçevesindeki pompa, sinyal ve idler dalga vektörleri [5], sırasıyla,

$$\begin{aligned} \vec{k}_{pompa} &= n_{pompa} (\theta_{pompa}, \phi_{pompa}) \frac{W_{pompa}}{c} \hat{S}_{pompa} \\ \vec{k}_{sin\ yal} &= n_{sin\ yal} (\theta_{sin\ yal}, \phi_{sin\ yal}) \frac{W_{sin\ yal}}{c} \hat{S}_{sin\ yal} \\ \vec{k}_{idler} &= n_{idler} (\theta_{idler}, \phi_{idler}) \frac{W_{idler}}{c} \hat{S}_{idler} \end{aligned} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanabilir. Belirli bir $\hat{s} = (s_x, s_y, s_z)$ doğrultusundaki $n(\hat{s})$ kırılma indisi,

$$\frac{\frac{s_x^2}{1 - \frac{1}{n_x^2}}}{n^2(\hat{s})} + \frac{\frac{s_y^2}{1 - \frac{1}{n_y^2}}}{n^2(\hat{s})} + \frac{\frac{s_z^2}{1 - \frac{1}{n_z^2}}}{n^2(\hat{s})} = 0 \quad (6)$$

ifadesiyle verilen indikatris denklemi kullanılarak bulunabilir [6]. Burada n_x , n_y ve n_z belirli bir dalgaboyu değerindeki kristalin ana kırılma indisleridir. Denk. (6)

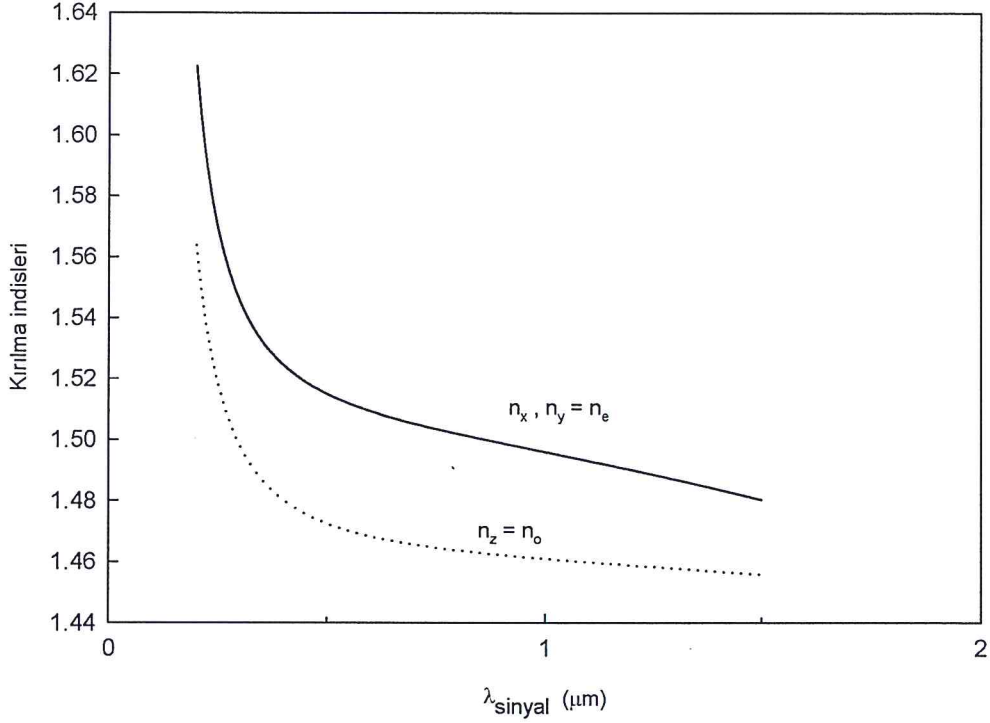
$$x^2 - \left[s_x^2 \left(\frac{1}{n_y^2} + \frac{1}{n_z^2} \right) + s_y^2 \left(\frac{1}{n_x^2} + \frac{1}{n_z^2} \right) + s_z^2 \left(\frac{1}{n_x^2} + \frac{1}{n_y^2} \right) \right] x + \left[\frac{s_x^2}{n_y^2 n_z^2} + \frac{s_y^2}{n_x^2 n_z^2} + \frac{s_z^2}{n_x^2 n_y^2} \right] = 0 \quad (7)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Bu ifade de $x = \frac{1}{n^2(\hat{s})}$ dir. Denk. (7), yukarıda tanımlanan faz

uyum koşuluyla birlikte düşünüldüğünde analitik bir çözüme sahip olmayıp nümerik olarak çözülmelidir. Bu çalışmada çeşitli kristallerin kırılma indislerinin dalgaboyuyla değişimi ve faz uyumlarının özelliklerinin incelenmesi amacıyla, Δk bir vektör niceliği olarak ifade edilip $|\Delta k| = f(\theta_{sin\ yal}, \theta_{idler})$ 'nin minimumunu bulan bir paket program kullanılmıştır [5].

Sonuçlar ve Tartışma

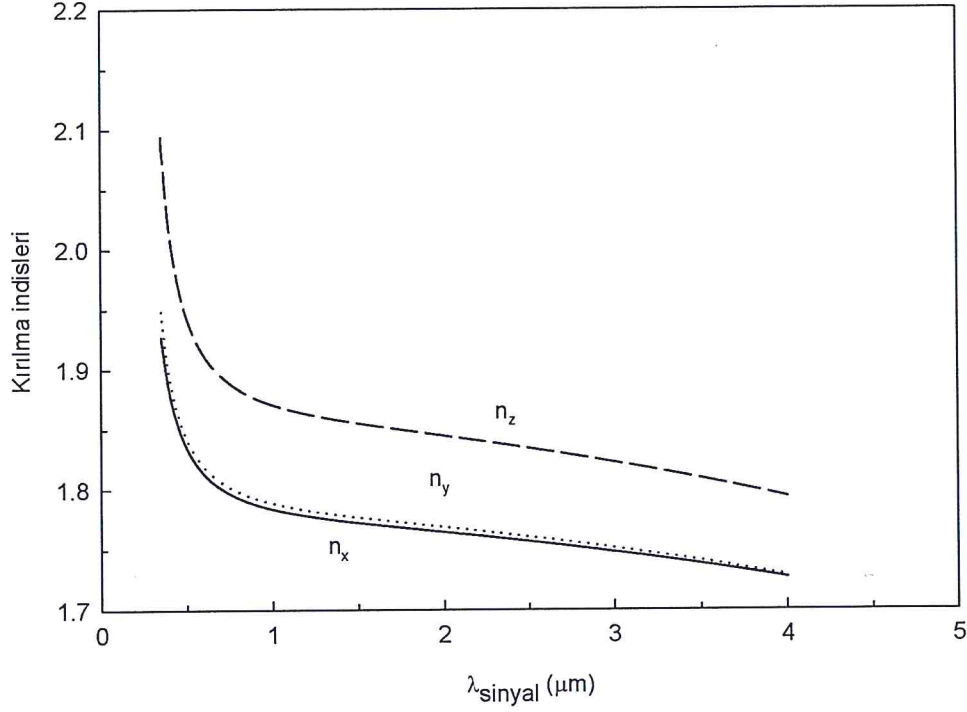
KDP



Şekil 1. KDP kristali için kırılma indislerinin dalgaboyu ile değişimi

Şekil 1 ve 2 kristal malzemeler için en temel bilgi olan kırılma indisinin dalgaboyuyla değişimini göstermektedir. Bu tür grafikler pompalama, sinyal ve idler dalgaboylarının özel bir kombinasyonu için faz uyumunun mümkün olup olmadığı hakkında bir ip ucu verir. Kırılma indis değerleri birbirine yakın olan kristallerde faz uyumu daha kolay gerçekleşir. Şekil 1' den KDP kristalinin iki farklı kırılma indis değerine sahip olduğu görülür. Ayrıca, bu kristal için $n_e > n_o$ olduğundan, pozitif tek eksenli bir kristaldir.

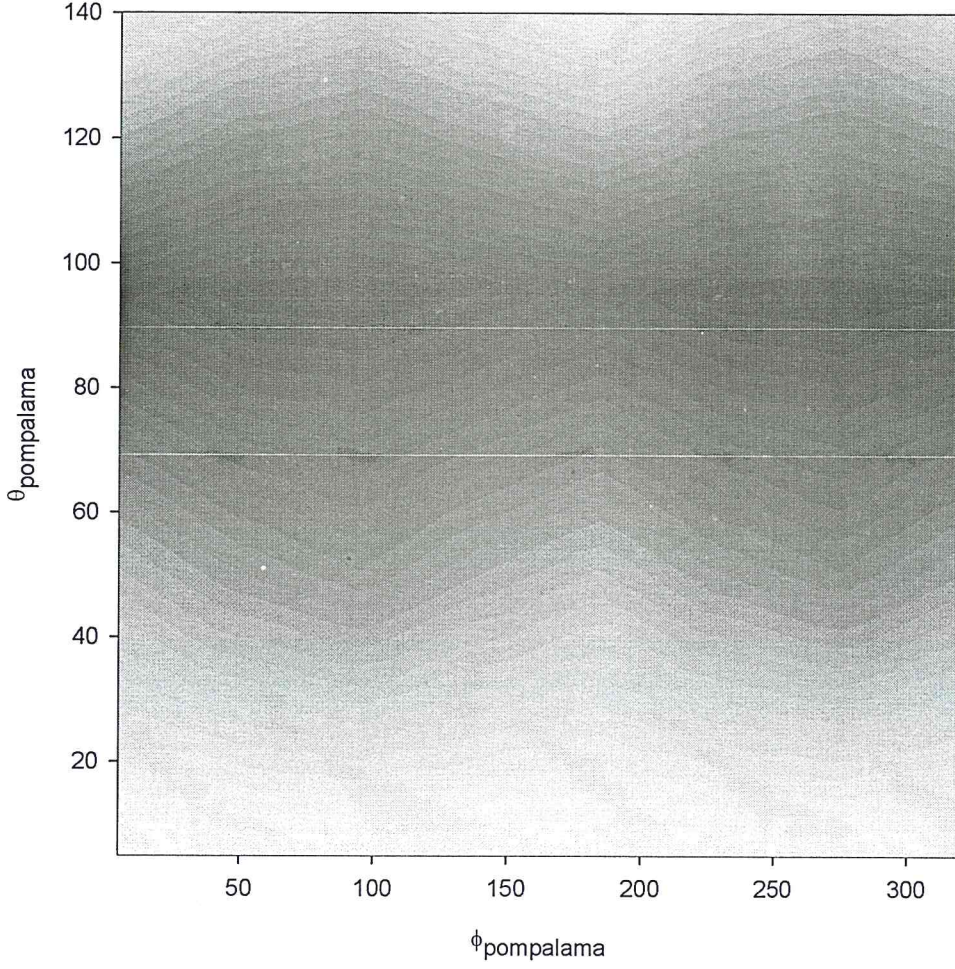
KTP



Şekil 2. KTP kristali için kırılma indislerinin dalgaboyu ile değişimi

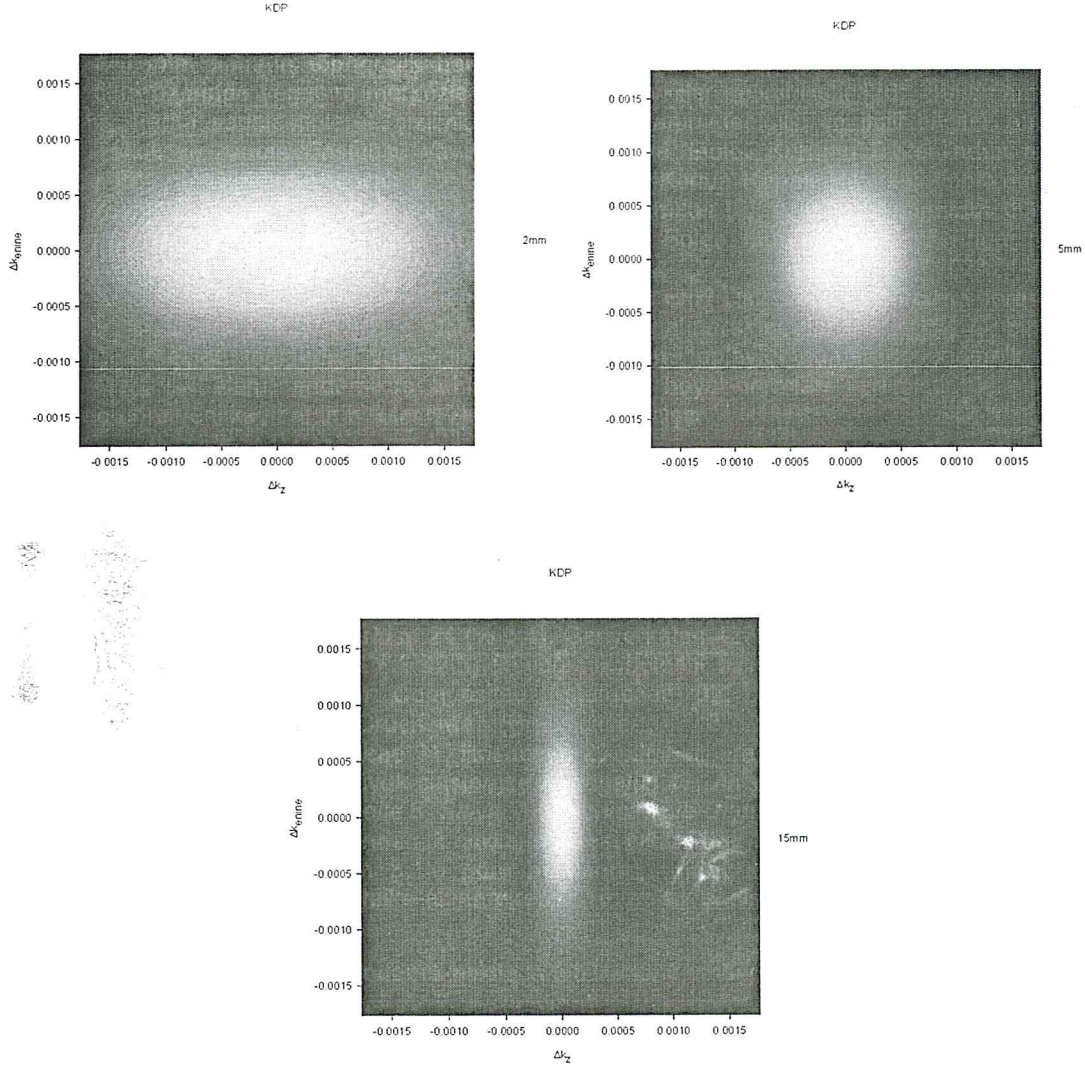
Şekil 2 KTP kristali için kırılma indisinin dalgaboyu ile değişimini göstermektedir. Şekilden KTP kristalinin üç farklı kırılma indis değerine sahip olduğu görülür. Bu nedenle KTP kristali çift eksenli bir kristaldir. Benzer şekilde kırılma indislerinin birbirine yakın olduğu dalgaboyu aralıklarında faz uyumunun gerçekleştirilmesi daha kolay olur. Bu durumu daha netleştirmek için Şekil 3' te kırılma indis farklarının $\theta_{pompalama}$ ve $\phi_{pompalama}$ açılarıyla değişimi gösterilmektedir. Şekilden, faz uyumunun genellikle Δn 'nin sıfırdan önemli ölçüde saptığı yerlerde yani açık renkli bölgelerde gerçekleşebileceği görülür. Bu şekil ayrıca hangi açı değerlerinde faz uyumunun gerçekleşebileceği hakkında bilgi verir.

KTP



Şekil 3. KTP kristali için Δn 'nin $\theta_{pompalama}$ ve $\phi_{pompalama}$ 'ya göre değişim grafiği

Şekil 4 KDP kristali için faz uyum fonksiyonunun farklı kristal uzunluklarıyla değişimini göstermektedir. Sonlu uzunluğa sahip kristallerde, bir miktar aşağı dönüşüm oluşturmak için sinyal ve idler vektörlerinin tam olarak pompalama vektörüyle toplanmasına gerek yoktur. Böyle durumlar için aşağı dönüşüm şiddeti, $\Phi \cong 1$ (yani $|\Delta k| \cong 0$) olduğu merkezi bölgelerde en büyük değere ve $\Phi \cong 0$ olduğu dış bölgelerde ise en düşük değere sahip olacaktır. Şekilden kristal uzunluğu arttıkça faz uyum bölgesinin z eksenine boyunca daraldığı kolaylıkla görülebilir.



Şekil 4. KDP kristali için faz uyum fonksiyonunun kristal uzunluğuyla değişimi

Sonuç olarak, yüksek dönüşüm veriminin elde edilmesi teknolojik olarak oldukça önemlidir. Yüksek dönüşüm verimi için en temel koşul faz uyumudur. Bu nedenle bu çalışmada bazı kristaller için faz uyum durumu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, faz uyumunun kristal boyutuna, açığa ve kırılma indis değişimlerine oldukça hassas biçimde bağlı olduğu bulunmuştur.

Kaynaklar

1. Armstrong, J.A., Bloembergen, N., Ducuing J. and Pershan P.S. *Interactions between Light Waves in a Nonlinear Dielectric*. Phys. Rev. 127 1918 (1962)
2. Ashkin, A., Boyd, G.D. and Kleinman, D.A. *Phasematched Second Harmonic Generation without DoubleRefraction* Appl. Phys. Lett. 6 179 (1965)
3. Bjorkholm, J.E. and Siegman, A.E. *Accurate CW Measurements of Optical Second Harmonic Generation in Ammonium Dihydrogen Phosphate and Cacite* Phys. Rev. 154 851 (1967)

4. Bloembergen, N. *Nonlinear Optics* W.A.Inc, California (1965)
5. Boeuf, N., Branning, D., Chaperot, I., Guering, S., Jaeger, G., Muller, A. and Migdall, A. *Calculating Characteristics of Noncollinear Phase Matching in Uniaxial and Biaxial Crystals* Opt. Eng. 39 1016 (2000)
6. Born, M. and Wolf, E.. *Principles of Optics* Pergamon Pres, Oxford (1980)
7. Boyd, G.D., Ashkin, A., Dziedzic, J.M. and Kleinman, D.A. *Second Harmonic Generation of Light with Double Refraction* Phys. Rev. 137 A1305 (1965)
8. Boyd, W. R. *Nonlinear Optics*, Academic Press Inc, Boston (1992)
9. François, G.E. *CW Measurement of the Optical Nonlinearity of Ammonium Dihydrogen Phosphate* Phys. Rev. 143 597 (1966)
10. Giordmaine, J.A. *Mixing of Light Beams in Crystals* Phys. Rev. Lett. 8 19 (1962)
11. Giordmaine, J.A. and Miller, R.C. *Tunable Coherent Parametric Oscillation in LiNbO₃ at Optical Frequencies* Phys. Rev. Lett. 14 973 (1965)
12. Hobden, M.V. *Phase Matched Second Harmonic Generation in Biaxial Crystals* Journal Of Applied Physics 38 4365 (1967)
13. Jerphagnon, J. and Kurtz, S.K. *Optical Nonlinear Susceptibilities: Accurate Relative Values for Quartz, Ammonium Dihydrogen Phosphate and Potassium Dihydrogen Phosphate* Phys. Rev. B1 1739 (1970)
14. Kleinman, D.A. *Nonlinear Dielectric Polarization in Optical Media* Phys. Rev. 126 1977 (1962)
15. Kleinman, D.A. *Theory of Second Harmonic Generation of Light* Phys. Rev. 128 1761 (1962)
16. Liu, H.J., Chen, G.F., Zhao, W., Wang, Y.S., Wang, T. and Zhao, S.H. *Phase Matching Analysis of Noncollinear Optical Parametric Process in Nonlinear Anisotropic Crystals* Optics Communications 197 507 (2001)
17. Phillips, R. *Temperature Variation of the Index of Refraction of ADP, KDP and Deuterated KDP* J. Opt. Soc. Am. 56 629 (1966)
18. Roberts, D.A. *Simplified Characterization of Uniaxial and Biaxial Nonlinear Optical Crystals : A Plea for Standardization of Nomenclature and Conventions* IEEE Journal of Quantum Electronics 38 2057 (1992)
19. Shen, Y. R. *The Principles of Nonlinear Optics* Wiley, New York (1984)
20. Sutherland, R. L. *Handbook of Nonlinear Optics* Marcel Dekker Inc, New York (1996)
21. Wang, J.T. and Daneshvar, K. *Numerical Calculation of Effective Second Order Nonlinear Coefficient Along Collinear Phase-Matching Directions Inside Nonlinear Crystals in Three-Wave Interaction* IEEE Journal of Quantum Electronics 32 183 (1996)
22. Yariv, A. *Optical Electronics* Holt, Rinehold Winston, Philadelphia (1985)
23. Zernike, F. *Applied Nonlinear Optics* John Wiley Sons Inc, New York (1973)
24. Zhang, W.Q. *Group-Velocity Matching in The Mixing of Three Noncollinear Phase-Matched Waves For Biaxial Crystal* Optics Communications 221 191 (2003)
25. Karabulut, İ. *Nonlineer Kristallerin Fiziksel Özellikleri ve Uygulama Alanları*, S. Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2004