

레이저공학 요약 _ 14주차 _2 비선형 레이저 (3)

지난 시간에는 2차 비선형 광학 현상에 대해 배워 보았다. 2차 비선형 광학 현상은 전자기파의 세기가 원자와 전자 사이의 힘에 준할만큼 클 때 생겨나며, 주파수가 2배가 되거나, 합차가 생기거나, 0이 되는 현상들이 발생한다 하였다. 원자에선 이런 현상이 항상 발생하지만, 실제 물질은 수많은 원자들로 구성되어 있고, 이 원자들은 서로 간섭하기에 실제로는 특정 방향으로 바라볼 겨우에만 선택적인 비선형 광학 현상이 일어난다고 하였다. 이 비선형 현상의 세기가 가장 강할 때의 각도를 위상 정합 각도라고 하였으며, 이는 주파수가 2배가 되어도 굴절률이 같은 상태를 만족하는 각도라고 하였다. 일반적인 물질에선 분산 때문에 절대 맞춰질 수 없는 조건이지만, 복굴절을 이용하면 이 조건을 맞출 수 있다는 것, 이를 맞추기 위해 입사각을 조절하거나 온도를 조절 하면 된다는 점, 이 조건을 맞추며 들어가는 편광 대비 나오는 편광의 방향성에 따라 Type 1과 Type 2로 나누었다는 점 까지가 25강에서 다뤘던 이야기임을 기억하며 비선형 레이저 이야기를 더 이어나가 보도록 해 보자.

비선형 레이저

그러면, 위상 정합 각도만을 맞춰 넣으면 비선형 레이저는 항상 잘 나올까? 이는 아니라고 할 수 있다. 각도와는 별개로, 비선형 레이저의 효율은 2차 비선형 광학 계수에 달려있게 된다. 복굴절을 설명하며 나왔던 용수철을 생각 해 보면, 방향에 따른 용수철의 두께와 세기가 다르고, 이로 인해 같은 세기가 들어와도 방향에 따라 흔들어지는 정도가 달라진다. 즉 들어가는 빛의 방향에 따라 효율이 달라진다는 말이고, 이는 위상 정합 상태에서도 마찬가지일 것이다. 유효 비선형 광학 계수는 이런 방향에 따른 효율을 결정하는 계수이며, 다음과 같은 식에서 유도된다.

$$P^{(2)} = \chi^{(2)} \vec{E} \vec{E} = d_{ijk} E_j E_k$$

여기서 d_{ijk} 가 바로 비선형 광학계수이며, 격자는 기본적으로 대칭 구조라는 점등을 고려하면 우리는 이 비선형 광학계수를 표현할 수 있다. LBO의 경우 결정 구조는 mm2이고, 이때 비선형 광학계수는 다음과 같다.

$$d_{ijk} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

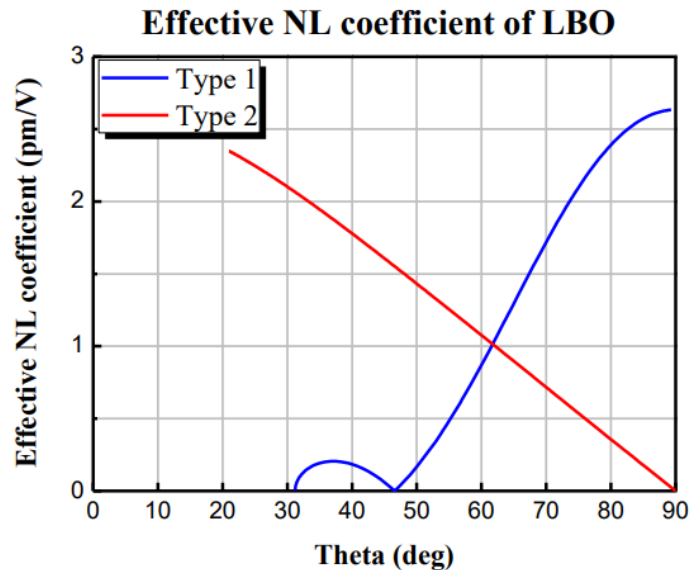
이때 (j,k)에 해당하는 부분의 수는 다음과 같은 관계를 가짐을 명심하자

<Table 1 – (J,K)의 값에 해당하는 J, K>

(J,K)	J	K
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	2	3
5	3	1
6	1	2

즉 d24는 실제로는 d223E2E3을 의미한다!

이 d값은 단위가 pm/V로 매우 작기에, 매우 큰 전자기파가 인가되어야 2차 비선형 광학 효과가 일어난다! 아래 그림은 LBO에 대하여 위상 정합을 따라가며 각각의 d값을 계산한 그림이다.



<Figure 1 – Effective NL coefficient of LBO>

90도에서 Type1의 d_eff가 가장 커짐을 볼 수 있으며, Type2는 20도일 때 가장 큼을 알 수 있다. 결국 위상 정합을 만족하며, d값이 가장 큰 방향이 2차 조화파가 일어나는 가장 효율적인 방향이라고 말할 수 있다!

위상 정합시 빛의 세기 식을 다시 보면 다음과 같다.

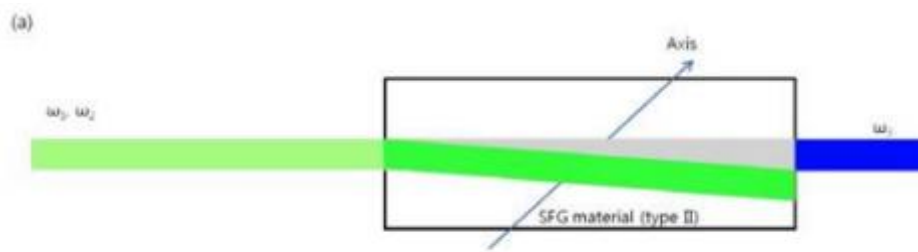
$$I_{2\omega} = \frac{8\pi^2 d_{eff}^2 L^2 I^2}{\epsilon_0 c \lambda_0^2 n_0^3} \frac{\sin^2(\Delta k L / 2)}{(\Delta k L / 2)^2}$$

해당 식만을 보면, L의 제곱에 빛의 세기가 비례하므로 소자의 길이는 무조건 길수록 좋다는 착각을 가질 수 있는데, 사실 소자의 길이는 walk-off angle이라는 현상에 의해 어느정도의 한계를 가

지게 된다. 이제 이 walk-off angle을 살펴보도록 해 보자

1. Walk-off angle

복굴절이 있는 물질에서는 편광에 따라 Ordinary wave와 extraordinary wave가 생김을 안다. 이 두 파는 진행방향이 다르고, 이것이 복굴절의 기본적인 원리라고 볼 수 있다. 만약 이런 복굴절 물질에 2차 조화파가 들어가면 어떻게 될까? 1차 선형 광파가 진행되는 방향과는 달리 2차 조화파는 편광에 대한 성분을 가지기에 진행되는 길이 꺾이게 될 것이다. 즉 2차 조화파는 레이저 빔이 진행되는 방향과는 다른 방향으로 진행하게 되며, 이를 보여주는 그림이 바로 아래의 그림이다.

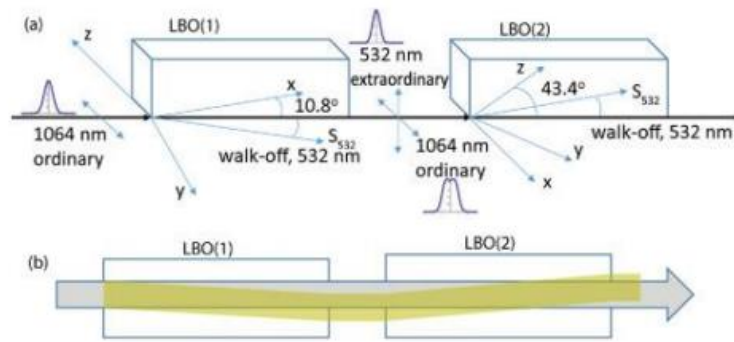


<Figure 2 – walk-off로 인한 빛의 진행>

결국 2차 조화파는 어느정도 길이를 넘어가게 되면 기존의 광파와 전혀 합쳐지지 못하며 효율이 감소하게 되며, 빔이 찌그러지며 세기가 치우쳐지게 된다. 이렇게 빔이 원래의 길을 벗어나는 현상을 walk-off angle이라고 하며, 이러한 현상을 억제하기 위해 소자의 길이에는 한계가 생길 수밖에 없다! 빔의 size 또한 이런 walk-off angle 현상에 의해 한계를 가지게 된다. Walk-off가 일어났을 경우, 빔 size가 작을때보다는 클 때 겹치는 부분이 더 많아지고, 이로 인해 빔 size가 작아지면 클때보다 효율이 안좋다고 볼 수 있다. 그런데 빔 size가 커진다는 뜻은 결국 세기가 작아진다는 뜻이고, 이 또한 효율의 감소로 이어지므로 두 효과 사이의 trade-off를 고려하여 적절한 빔 size를 고를 필요가 있다!

Walk-off가 0인 물질은 무엇일까? Walk-off를 없애기 위해서는 빛의 입사 방향을 결정축으로 넣어 주면 된다. 이렇게 넣을 경우 Ordinary wave와 Extraordinary wave의 진행 방향이 같아지는데, 이때 위상 정합 조건을 만족하게 되면 우리는 이를 NCPM(Noncritical Phase matching)이라고 하며, 이를 만족하면 사용하는 결정 길이의 제한이 없어질 것이다! NCPM 말고도 walk-off를 없앨 수 있는 방법이 있는데, 이를 walk-off compensation이라고 하며, 대략적인 원리는 walk-off 현상으로 인해 엇나간 빛의 진행 방향을 또 다른 walk-off 현상으로 되돌리는 과정이라고 생각 하면 된다

이에 대한 자세한 그림이 바로 다음의 그림이다.

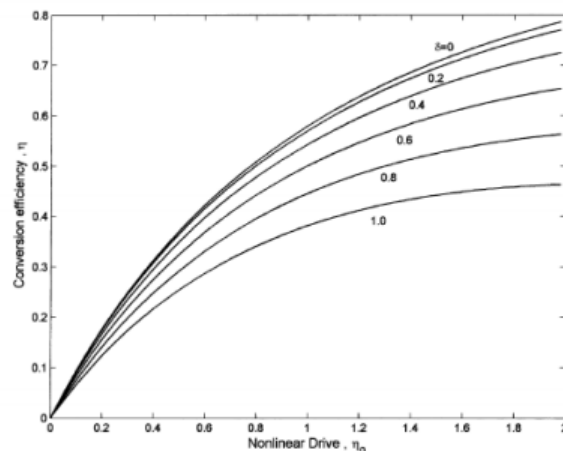


<Figure 3 – Walk-off compensation>

+ BBO와 LBO?

BBO와 LBO는 모두 합성한 물질인데, BBO에는 알파 BBO와 베타 BBO가 있으며, 2차 비선형 광학 효과를 가지는 BBO는 베타 BBO이다. 이 BBO는 walk-off가 컸는데, 이를 해결하기 위해 B 대신 L로 합성해 walk-off를 줄인 물질이 바로 LBO이다. LBO는 상당히 재밌는 물질인데, 1064 nm 기준으로 온도를 올리게 되면 세타가 90도일 때 파이 값이 0도까지 떨어지는 현상이 생긴다. 즉 X방향으로 위상 정합이 일어나고, 이것이 바로 LBO의 NCPM이다. 즉 LBO를 약 145~150도 사이로 올리게 되면 LBO는 NCPM이 되며 위에서 말했듯, 이때 LBO는 결정 길이의 제한이 없어진다. 파장이 짧아질수록 NCPM을 맞추려면 더 높은 온도가 필요함을 기억해 두자.

결국 좋은 2차 조화파를 얻기 위해 우리는 위상 정합을 만족하고, d값을 크게 하며, walk-off를 줄여야 할 것이다. 그런데 우리가 다루는 이 빛은 결국 레이저이며, 이 세가지 조건을 충족시키기 위해 사용한 식 자체는 레이저가 출발했던 지점과 관측하는 지점에서 같은 파장, 주파수를 가지며 레이저 빔의 세기가 거의 변하지 않는다는 것을 전제로 한 것이다. 그런데 2차 조화파는 자기 자신의 w 를 2배로 변환시키는 등의 과정을 거친다는 것을 생각 하면, 에너지 보존 법칙에 의해 레이저 빔의 세기를 달라질 수밖에 없고, 결국 효율은 갈수록 감소할 수밖에 없다.

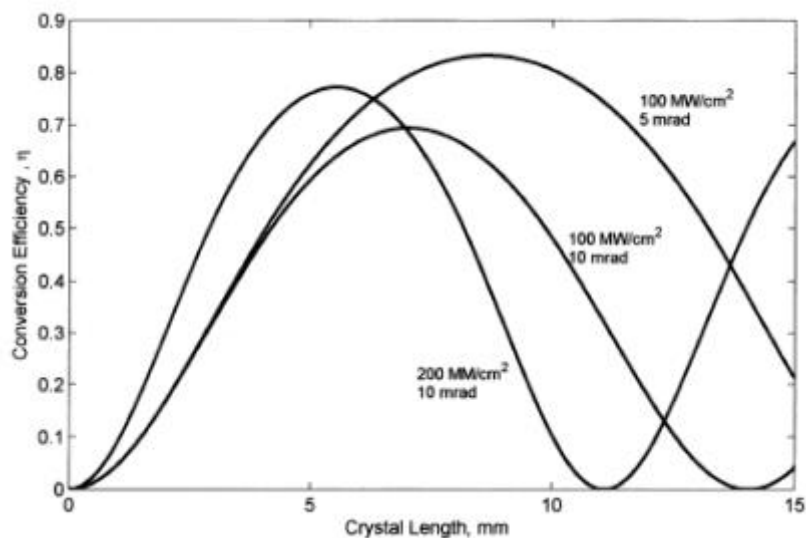


<Figure 4 – SHG 발생으로 인한 세기의 감소, 효율의 감소>

마지막으로 하나를 더 생각해 보자. 지금까지 우리는 레이저 빔이 퍼지지 않는다는 것을 전제로 하였으나, 결국 레이저 빔도 퍼진다는 것은 이미 배운 사실이다. 즉 위상 정합의 각도로 진행을 한다 해도 레이저 빔이 퍼짐에 따라 위상 정합의 각도는 퍼짐 각 만큼의 오차율을 가지게 된다. 이를 해결하려면 퍼짐 각의 크기 자체를 줄여야 할 필요가 있는데, 빔의 퍼짐이라는 것은 결국 M스퀘어, 파장, waist size 등에 의존하는 아래와 같은 식이 있었음을 되새겨 보자.

$$\theta = M^2 \frac{2\lambda}{\pi W_{0M}}$$

결국 퍼짐 각을 줄이려면 짧은 파장과, 큰 beam size를 가지는 레이저를 쓰면 유리하겠지만, 이들은 지금까지 배워왔던 여러 현상과의 trade-off 때문에 크게 변화시키긴 힘들 것이다. 결국 퍼짐 각을 결정하는 여러 요소 중 우리가 건들 수 있는 성분은 M스퀘어고, 결국 좋은 레이저 빔을 만들어야 작은 퍼짐 각을 가질 수 있고, 이에 따라 더 좋은 효율을 가질 수 있다는 결론을 얻어 낼 수 있다. 아래는 결정의 길이에 따른 효율 곡선인데, 최적화된 길이가 효율에 어떤 영향을 끼치는지를 보여주고 있는 그림이다.



<Figure 5 – 결정 길이에 따른 Conversion 효율 변화 곡선>

지금까지 우리가 배운 위상 정합 방법 외에도, Quasi-phase matching, QPM이라고 부르는 방법이 존재한다. 이를 준 위상 정합이라 하는데, d의 부호를 바꾸어 떨어지는 현상이 없이 효율적인 비선형 광학 현상을 만들어 내는 방법이다. d의 부호를 바꾼다는 것은 z축의 부호를 바꾼다는 것이고, 이렇게 z축을 바꿀 수 있는 대표적 물질이 강유전체, 이 중에서도 LiNbO₃, LiTaO₃, KTP 등이다. QPM을 사용하면 walk-off가 없어지고, 여러 d값중 제일 큰 값만을 이용할 수 있고, 위상 정합이 되지 않는 물질도 QPM 방식을 이용해 좋은 효율을 유도할 수 있다. 물론 QPM에 장점만 존재하는 것은 아닌데, 이들은 Laser 문턱 전압이 매우 낮고, 길이가 마이크로 수준이기에 소자를 균일하게 만들기도 어렵고, 강유전체가 Laser에 대한 Damage가 낮기 때문에 고출력에 사용할 수는

없고, 주로 저출력 방식에 이용하게 된다.

+ 1064로부터 355를 만드는 과정은 Third harmonic generation이 아니다!

Third harmonic generation은 엄밀하게 말하면 한 번에 파장을 1/3을 줄이는 것이지만 1064로부터 355를 만드는 과정은 2차 비선형 광학 효과를 통해 1064를 532로 만들고, 이들을 다시 더하여 355를 얻는 과정이다. 즉 이 과정은 이차 비선형 광학 효과를 두 번 쓰는 과정으로 SHG와 같은 원리이지 Third harmonic generation이 아님을 유의하자.

+ Gray tracking이란?

가시광 영역, UV 영역의 강한 빛이 지나가면 일부 물질은 이 빛을 흡수하여 영구 손상을 유도하게 된다. 이를 Photorefractive damage라고 하며, 빛이 지나감에 따라 불투명한 회색 띠가 보이는데 이 현상이 Gray tracking이다.