

# 광기술 연구·개발 현황

과학기술부지정 창의적연구진흥사업

## 양자결맞음통신연구단

<http://cqcc.etri.re.kr>

합병승  
한국전자통신연구원  
bham@etri.re.kr

### 1

2000년 10월 과학기술부 창의적연구진흥사업으로 선정된 본 “양자결맞음통신 연구단”은 검은공진이라는 비흡수 공진 양자광학현상을 이용하여 현 정보통신/정보처리기술의 물리학적 한계를 극복하고 21세기 지식정보사회의 핵심인 정보전달/정보공유의 원활한 전이를 담보하기 위한 광정보통신의 하부구조를 견고하게 구축함을 그 목적으로 한다. 현 광통신 광스위칭기술의 근본적인 한계는 밀도전이시간으로 압축하여 말할 수 있다. 물론 밀도전이시간에 따른 스위칭시간의 한계를 피하고자 비선형 광특성을 이용한 방법을 사용하기는 하지만 이러한 방식에의 문제점은 비선형계수가 매우 작아 이를 보상하기 위해서는 높은 에너지를 사용해야만 하는 문제가 있다. 하여튼, 어떠한 방식을 사용하든 현재의 광소자기술의 스위칭 속도한계는 대략 100 GHz로 10년 후 예측되는 100Tbps의 백본 네트워크의 전송용량을 감당하기에는 턱없이 부족한 실정이다. 이에 본 연구단에서는 광스위칭기술의 가장 근본적인 제약이 되는 밀도전이시간에 따른 스위칭시간의 한계를 극복할 것을 기본목적으로 하여 향후 10년내 예측되는 ~Pbps 광통신 시장을 구축하기 위해 지금과는 전혀 다른 새로운 개념의 sub-ps속도의 양자스위치와 hyper-THz의 대역폭을 갖는 양자변조기를 연구개발하고 있으며 여기서는 이에 대한 일반적인 소개를 하고자 한다.

### 2

지금부터 약 10여년 전, world wide web(www)의 출현으로 촉발된 정보통신사회의 진입은 지난 10여년 동안 급속한 발전과 진보를 거듭하여 인터넷이라는 가공할 만한 사이버세계를 구축했으며, 현재는 무선인터넷의 확장과 더불어 전체 정보통신용량이 기하급수적으로 증가하고 있으며 그 증가율은 연 300%에 이른다. 이러한 추세라면 향후 10년 내에 세계 정보통신용량은 100Tbps에 다가설 것인데 이러한 초대용량의 정보를 지체없이 처리할 광정보처리기술이 있느냐 하는 것은 미래를 대비하기 위한 가장 기초적이고 중요한 질문이 된다.

일반적으로 광통신은 전송부와 교환부 그리고 수신부로 나눌 수 있는데 파장분할(WDM) 기술을 사용하던 시간분할(TDM) 기술을 사용하던 개개의 변조기 대역폭은 전송부의 최대 전송가능용량을 결정짓는 기초단위가 된다. 만일 100GHz 변조대역폭을 갖는 광변조기를 사용하여 100개의 광채널을 확보하여 이용한다면 전체 전송용량은 최대 ~10 Tpbs가 되는 것이다. 물

론 수신부에서는 전송부의 역순으로 생각하면 되기 때문에 전송부와 함께 묶어서 생각할 수 있다. 따라서, 광채널수의 증가는 아주 쉽게 전체 정보통신용량을 늘릴 수 있는 손쉬운 방법이 되기는 한데 이때 나타나는 문제는 교환부를 구성하는 광스위치에 있다. 왜냐하면, 교환부를 구성하는 광스위치기술은 전송부를 구성하는 개개의 변조기 기술에 국한되며 따라서  $N \times N$ 으로 구성된 매트릭스 방식의 광스위치를 고려할 때 엄청난 수의 광스위치와 이들을 통제할 대규모의 통제장치가 필요하게 되고 이는 매우 복잡한 기술문제일 뿐만 아니라 고가의 장비가격으로 직결되기 때문에 현실적으로 많은 문제를 야기하게 된다.

따라서, 간단하면서도 대역폭이 넓은 광스위치기술은 조기확보되어야 하는데, 현재의 기술적 방식 즉, 선형흡수변화를 이용하는 방식에선 밀도전이시간에 한계되므로 수십 GHz를 넘기가 힘들고 비선형방식에서조차 대역폭은 수백 GHz가 그 한계로 100 THz의 용량을 처리하기에는 위에서 언급한 구성의 복잡함과 경제적인 부담은 차치하고서라도 그 구성에 있어 근본적인 한계가 있다. 그러므로, 적어도 수 THz의 광스위치속도를 갖는 기술의 확보는 미래 정보통신시장을 주도하기 위한 근간이 되며, 이를 위해서는 기존의 기술과는 완전히 차별된 새로운 방식에서의 접근이 필요하다 하겠다.

## 검은공진유도 양자스위칭

### 가. 검은공진

검은공진현상은 양자광학현상으로 비흡수 공진으로 간단히 표현할 수 있다. 즉, 공진전에서 광흡수가 일어나지 않는 현상인데 이는 1976년 Pisa대학에서 분광학 실험으로 우연히 관측된 이래 90년대 수 많은 응용분야가 제시되면서 검은공진 연구에 있어 비약적인 발전을 가져오게 된다<sup>[1]</sup>. 그 중 비선형광학, 밀도전이없는 레이저, 양자메모리, 고해상 분광학, 찌그러짐없는 광펄스전송등은 그 좋은 예다.

그림 1은 3개의 에너지 준위를 갖는 물질에 작용하는 두개의 레이저를 나타내는데 여기에 2개의 서로다른 파장을 갖는 레이저는 특정한 조건이 만족될 때 물질에 공진함에도 불구하고 흡수되지 않고 통과하게 되는 기이한 현상을 겪게 된다. 이러한 물리적인 현상을 흔히 "전자기유도투과(EIT)"라고 표현하는데 이의 물리적 원인은 물질-파 상호작용으로 인한 파괴간섭현상에 의한 비흡수에 있다. 물론 이러한 전자기유도투과는 saturation spectroscopy에서의 bleaching과는 근본적으로 다르며 이를 증명하는 여러가지 실험적 결과들 중 하나는 비흡수 공진 선평이 자연전이 선평보다 훨씬 좁다는데 있다. 여기서 검은공진에 의한 좁은 선평 특성은 90년대 말 새로운 분광학 연구를 제시하기도 했다. 검은공진 현상은 애초 기체를 사용하여 수 십년간 연구되어 오다가 90년대 중반 고체에서의 실험결과들이 몇몇 나온 이래 최근에는 반도체를 이용한 응용연구가 제시되고 있으며<sup>[2]</sup>, 반도체를 이용한 검은공진 연구는 기체에서 예측되는 수 많은 응용분야를 실생활로 연결시켜 주 것이 확실하다<sup>[3]</sup>. 그 중 한 예로 본 연구단에서는 양자스위칭을 제안하여 미래의 양자정보통신을 연구하고 있으며, 고효율/초고속 파장 변환기, THz 발생기, 밀도반전없는 반도체 레이저, 양자전신, 양자통신등도 중요한 연구분야가 된다.

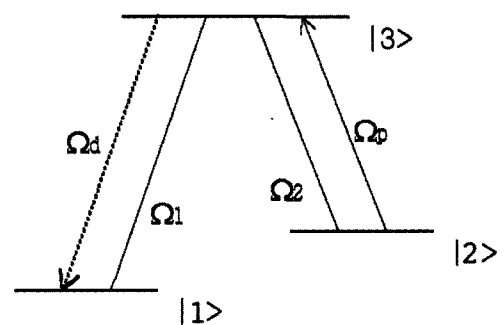


그림 1. 검은공진 유도 비흡수 네파장 위상전행

### 나. 두양자결맞춤

검은공진의 대표적인 특성은 비흡수 공진이라고 위에서 설명했는데, 이러한 비흡수 공진현상은 파장섞음진행과정에서 매우 중요한 기능을 제공하게 된다. 다시말해, 물질에 작용하는 레이저의 주파수가 공진전에서 멀어질수록 비

선형계수가 떨어짐에도 불구하고 그리할 수 밖에 없는 이유는 바로 공진주파수에서 일어나는 광흡수를 피하기 위해서다. 그러나, 검은공진현상을 이용하면 공진주파수에서 광흡수는 일어나지 않기 때문에 높은 비선형 흡수계수를 그대로 이용할 수 있으며, 따라서 미약한 펄스레이저를 사용해서도 충분히 높은 결과를 얻을 수 있다. 검은공진을 이용한 구체적인 예로는 그림 1의 4파장섞임진행현상을 들 수 있는데 이때 4파장섞임과  $\Omega_2$ 는 공진주파수에서 최대가 되는데 이는 비흡수공진과 더불어 4파장섞임과의 크기를 결정짓는 두양자결맞음이 공진주파수에서 최대가 되기 때문이다. 여기서, 두양자결맞음  $\rho_{12}$ 는 레이저 1에 의해 에너지 준위  $|1\rangle$ 에서 여기상태의  $|3\rangle$ 을 거쳐  $|2\rangle$ 로 가는 두양자 흡수작용으로  $|1\rangle - |2\rangle$ 에 간접적인 결맞음을 유도하게 된다. 이러한 결맞음유도를 두양자결맞음이라고 하는데 이 두양자결맞음의 크기는 곧 레이저  $\Omega_2$ 에 의한 4파장섞임진행과  $\Omega_1$ 의 세기를 결정짓게 된다. 이러한 실험결과는 이미 회트류를 이용하여 증명한 바 있다 (그림 2 참조)<sup>[2]</sup>.

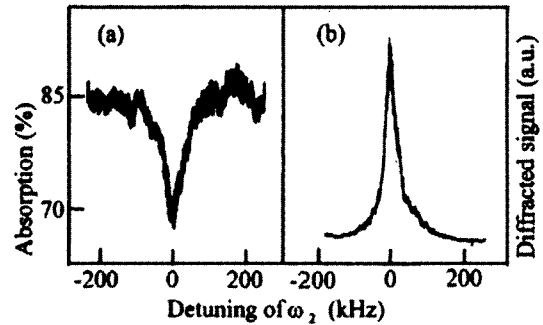


그림 2. (a) 레이저 1의 세기 -  $\Omega_1$ 와 흡수스펙트럼, (b) 검은공진현상 비흡수공진주파수 -  $\Omega_2$  (참고문헌[2])

다. 양자변조

그림 1에서 물질 (atom, ion, etc) - 파 (electromagnetic wave) 상호작용의 결과는 검은공진 즉 전자기유도투과 (그림 2a) 현상을 만든다는 것은 이미 앞서 설명하였다. 또한 검은공진은 두개의 결맞는 레이저가 한쪽의 기저상태로부터 여기상태를 거쳐 다른 쪽 기저상태로 마치 두개의 기저상태에 직접 광자가 작용하듯 결맞음을 유도한다는 것도 설명하였다. 이러한 두양자결맞음은 두개의 레이저가 특수한 조건하에서 작용할 때, 시간에 따라 진동하는 결맞음도 유도하는데 이 진동주기는 작용한 레이저의 라비주파수와 같게 됨을 설명하고자 한다.

그림 3은 그림 1을 중첩계에서 본 다른 표현이다. 즉 결맞음계 기저상태의 에너지 준위 ( $|-\rangle, |+\rangle$ )는 그림 1의 기저상태의 에너지 준위 ( $|1\rangle, |2\rangle$ )의 중첩상태로 표현되는데 이렇게 하면 비흡수공진상태를 증명하기가 쉬우며 두양자결맞음의 물리학적 이해를 도울 수 있다. 그림 3에서 표현된 기저상태 중 하나인 비흡수공진상태  $|-\rangle$ 는 레이저가 물질에너지 준위에 공진함에도 불구하고 그 광자는 전혀 흡수되지 않게된다. 이때 만일 여기상태 ( $|3\rangle$ )에서 기저상태 ( $|-\rangle, |+\rangle$ )로의 밀도전이율 (population decay rate)이 레이저의 작용시간에 비해 매우 길고 라비주파수가 상대적으로 매우 크다면 기저상태로부터 여기상태로의 작용전이는 오직  $|+\rangle - |3\rangle$ 으로만 표현될 수 있게 된다. 따라서, 그림 1의 두개의 레이저가 작용하는 3단 에너지계는 그림 3에서처럼  $|+\rangle$ 와  $|3\rangle$ 의 에너지 준위와 일반화된 레이저  $\Omega(\Omega^2 = \Omega_1^2 + \Omega_2^2)$ 로 구성된 1개의 레이저가 작용하는 2단 에너지계처럼 표현될 수 있게된다. 이렇게 되면 잘 알고있듯 라비돌기 (Rabi flopping)가 생기게 되어 한 에너지 준위에서

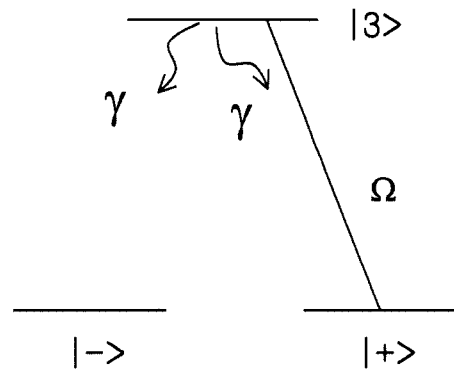
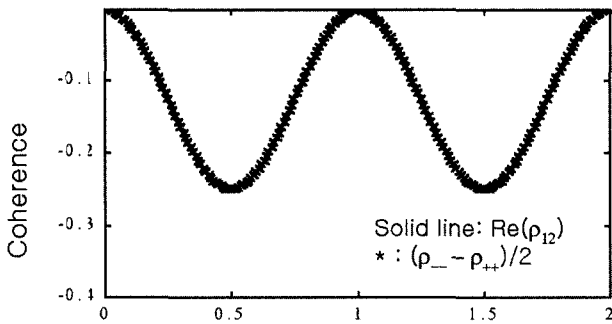
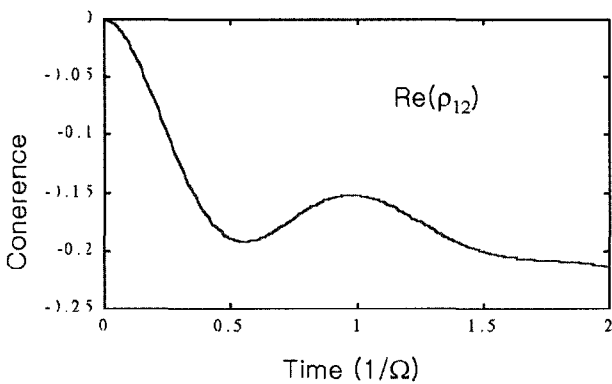


그림 3. 그림 1의 coherent state picture :  $|-\rangle = (\Omega_1|1\rangle - \Omega_2|2\rangle)/\Omega$ ;  $|+\rangle = (\Omega_1|1\rangle + \Omega_2|2\rangle)/\Omega$ , where  $\Omega^2 = \Omega_1^2 + \Omega_2^2$



(a) 밀도전이율  $\Gamma=0$ ; 위상전이율  $g=0$ .



(b) 밀도전이율  $\Gamma=2\pi$ ; 위상전이율  $\gamma=20\pi$ .

그림 4. Coherence falling time

네파장진행파는  $\Omega_2$ 에 따라 나타내게 되는 것이다. 여기서 중요한 것은 두양자결맞음의 반감기 (coherence falling time)는 여기상태나 기저상태의 밀도반감기와는 상관없는 위상전이율 (phase decay rate)에 관계되는데 그 중 기저상태의 위상전이율에 직접적으로 관계된다. 따라서, 기저상태 즉  $|1\rangle - |2\rangle$  사이의 위상전이율을 인위적으로 변환시켜 밀도전이율보다 빠르게 하면 그만큼 두양자결맞음의 변조대역폭을 크게 할 수 있게 된다. 그러므로 양자변조의 특성은 기존 광스위칭의 한계인 밀도전이 시간의 한계를 극복하고 초고속 광변조를 할 수 있다는 데 있다.

양자변조의 또 다른 중요한 특징은 검은공진에 기초한 4파장섞임진행파는 신호파에 비해 수십배 증폭될 수 있으므로 작은 신호를 추가적인 증폭기 사용없이 게다가 소음없이 증폭할 수 있는 장점을 제공하게 된다. 이러한 신호증폭은 지난 1995년 P. Hemmer에 의해 실험적으로 증명되었다<sup>[4]</sup>.

### 라. 양자스위칭

양자스위칭의 개념은 2000년에 최초로 제안되었는데<sup>[5]</sup>, 그 현상은 그림 5에서 보듯 3개의 바닥상태와 1개의 들뜬상태로 구성된 물질계에 3개의 레이저가 작용할 때 나타난다. 이것은 위에서 설명한 두양자결맞음간의 교환현상에 기초하게 되는데 그 원리를 설명하면 다음과 같다. 그림 5의 기저상태를 구성하는 3개의 에너지 준위에 작용하는 3개의 레이저는 그림 2에서와 같이 서로 다른 3개의 두양자결맞음을 유도할 수 있다. 즉  $|1\rangle - |2\rangle$ ,  $|1\rangle - |3\rangle$ , 그리고  $|2\rangle - |3\rangle$ 이 그것이다. 이때 특수한 환

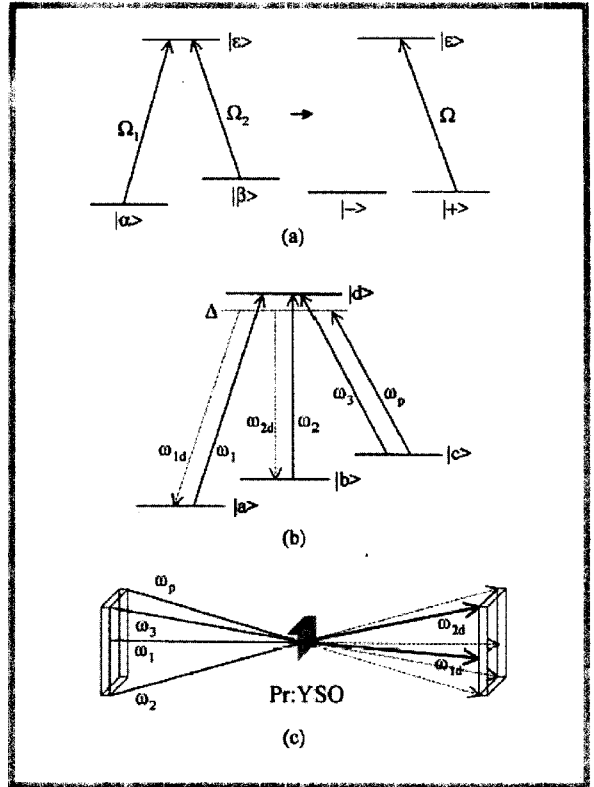
(예를 들면  $|+\rangle$ ) 시간에 따른 밀도변화는 사인파형태로 표현되게 된다. 그런데, 여기서 그림 1의 두양자결맞음  $\rho_{12}$ 를 그림 3의 기저상태의 밀도차이로 정의하면 다음과 같이 표현된다:

$$\rho_{12} = -(\rho_{-} - \rho_{+})/2$$

이것을 증명하기 위해 그림 1에 해당하는 해밀토니안을 density matrix equation을 위해 수식적으로 풀 것을 그림 3의  $|+\rangle$  상태에서의 밀도변화와 비교하면 그림 4(a)에서 나타나듯 서로 일치하게 된다. 여기서는 밀도/위상 전이율이 0이기 때문에  $\rho_{-}$ 의 값은 시간에 관계없이 0이 되므로  $\rho_{12}$ 의 값은  $-\rho_{+}/2$ 에 해당한다. 물론 실제적인 물질계에서는 전이율이 0이 아니기 때문에 작용시간이 충분히 주어지게 되면 모든 밀도는 레이저에 작용하지 않는 포획상태 즉 검은상태  $|-\rangle$ 에 모이게 되어 라비돌기는 끝나게 된다 (그림 4(b) 참조).

양자변조는 바로 위에서 설명한 두양자결맞음을 이용하여 구현할 수 있다. 이미 앞서 설명한 것처럼 검은공진에 기초한 네파장섞임진행은 두양자결맞음의 크기에 비례하기 때문에 두양자결맞음을 조절하게 되면 역으로 네파장진행파를 조절하게 되는 것이다. 여기서 두양자결맞음은 레이저 두개가 모두 존재할 때만 일어나게 되므로 한 쪽 레이저를 조절하게 되면 결과적으로 네파장진행파를 조절할 수 있게 된다. 다시 말하면  $\Omega_1$ 은 cw로,  $\Omega_2$ 는 신호조절필스로 하면

경에서 3개의 레이저 중 1개를 조절하여 위에서 언급한 두양자결맞음의 세기를 서로 교차하게 할 수 있는데 이러한 두양자결맞음 교환 현상은 따라서 검은공진 유도 네파장섞임진행 교환으로 연결된다. 즉, 검은공진 유도 광스위칭이 가능하게 되는데 이러한 광스위칭 현상을 본 연구단에서는 양자스위칭이라 이름붙이게 된 것이다. 그림 6은 기초적인 양자스위칭의 실험결과를 보여준다. 물론 그림 6의 결과는 cw상태에서 얻은 것이기 때문에 진정한 의미의 양자스위칭이라고는 볼 수가 없다. 두양자결맞음의 교환현상을 물리적으로 설명하자면,  $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$  간에 유도된 두양자결맞음  $\rho_{23}$ 는 레이저  $\Omega_1$ 에 의해 파괴되게 되는데 그 이유는 그림 7에서 보듯 검은공진이  $\Omega_1$ 에 의해 억압되기 때문이다. 반면,  $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$  사이에 새로운 두양자결맞음  $\rho_{13}$ 가 유도되어 결과적으로  $\Omega_1$ 의 파장조절을 통해 두양자결맞음  $\rho_{13}$ 와  $\rho_{23}$ 의 교환현상을 유도하는 것이다. 물론 이러한 두양자결맞음의 광학적 검출은 4파장섞임진행을 통해 얻는데 앞의 양자변조에서 설명했듯 증폭과 밀도전이시간에 무관한 스위칭이 가능하여 기존의 광스위칭기술의 한계를 극복할 수 있게된다. 최근 본 연구단에 의해 실험적으로 이러한 원리가 증명되었는데 희토류 도핑된 결정질 물질을 사용하여 밀도전이시간보다 무려 200배나 빠른 양자스위칭을 보였다. 여기서 특별히 강조할 점은, 양자스위칭은 시간축으로 뿐만 아니라 공간축으로도 스위칭을 하기 때문에 라우팅이 가능하다는 것이다. 즉, 두개의 독립적인 방향을 갖는 광스위칭이 양자스위칭을 통해 구현되는 것이다.



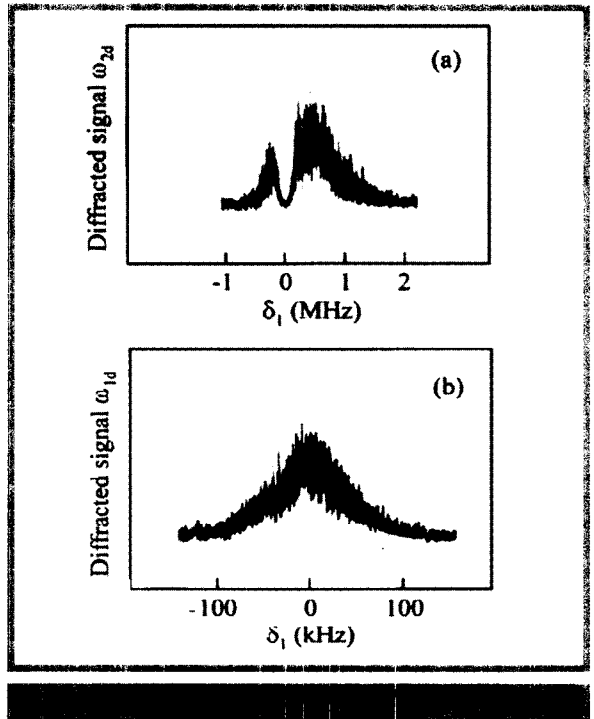
**4 양자스위칭을 통한 연구내용**

**가. 반도체에서의 검은공진**

그림 1에서 검은공진을 위한 필요조건은 작용하는 레이저의 라비주파수가 위상전이시간의 역수보다 커야 한다:

$$\Omega^2 \gg \gamma_1 \gamma_2$$

여기서 위상전이율 (phase relaxation rate)  $\gamma_1$ 은 inhomogeneous broadening을 당연히 포함한다. 일반적으로 1족 원소의 Na이나 Rb에서  $\gamma_2$ 는 매우 작기 때문에 라비주파수  $\Omega$ 는 도플러넓어짐을 고려하더라도  $\gamma_1$ 와 비슷한 수준에서 결정된다. 하지만, 최초의 검은공진 실험에 사용된 희토류를 살펴보면 같은 세기의 레이저를 고려할 경우 dipole transition이 없기 때문에 라비주파수는 약 천분의 1 정도로 매우 약하며 위상전이율은 1족 원소보다 10배 정도 크다. 따라서, 희토류를 사용할 경우 1족 원소에서의 검은공진효율과 같게하기 위해



서는 백만배 이상 큰 레이저 세기가 필요하게 된다. 따라서, 기존의 cw dye 레이저로는 고체에서 검은공진증명이 이론적으로 거의 불가능하다. 하지만, 희토류의 특징인 spectral hole burning을 이용하면 위상전이율을 천분의 1 이하로 줄일 수 있게 된다. 따라서 비슷한 레이저 세기를 사용하여 이론적으로 검은공진을 유도할 수 있게 되며 이것은 실험적으로 1997년 최초로 증명되었다.

반면, 반도체는 1족원소나 희토류와는 또 다른 점이 있는데 그것은 위상전이율이 수 THz에 이를 정도로 굉장히 크다는 점이다. 물론 이러한 위상전이율은 phonon작용을 줄임으로, 즉 온도를 낮춤으로써 작게 할 수 있으며 액체 헬륨온도에서 반도체 양자우물구조를 사용할 경우 실험적 결과들은 수십GHz 정도로 낮출 수 있음을 보여주고 있다. 또한 반도체양자우물구조에서의 1족 기체원자들보다 커다란 dipole transition은 같은 세기의 레이저를 사용할 경우 10배 이상의 라비주파수를 생산하게 되어 수십 마이크로 크기의 작용점을 고려할 경우 위의 검은공진조건을 만족하기에는 이론적으로 무리가 없어 보인다.

그러므로 본 연구단에서는 반도체 양자우물구조나 양자점을 이용하여 실험적으로 양자스위칭의 기본조건인 검은공진현상을 증명함을 그 우선목표로 하고 있으며 현재 피코초 레이저를 사용하여 연내에 이를 실험적으로 증명하고자 한다. 이러한 반도체에서의 검은공진실험은 기존의 1족 기체원자를 사용하여 증명된 수많은 비선형/양자광학의 응용분야를 그대로 확장하여 새로운 학문분야의 연구를 촉발시키게 된다. 예를 들면, 밀도반전없는 반도체 레이저연구로 청색뿐만 아니라 자외선 영역의 반도체 레이저 연구를 촉진시키고, 위상전이시간에 의존하는 양자메모리연구는 그 속도가 최소한 THz에 이르기 때문에 현재 실리콘을 이용한 컴퓨터 소자의 속도향상에 획기적인 변화를 가져오게 된다. 이는 곧 새로운 방식의 컴퓨터 CPU, 메모리 등 광컴퓨터 연구를 기존의 방식과는 전혀 다른 쪽으로 접근하게 하게 할 것이다.

### 나. 반도체를 이용한 양자변조기 연구개발

위의 검은공진현상이 반도체 양자우물구조나 양자점을 이용하여 증명되게 되면 우선 먼저 응용할 수 있는 분야는 양자변조기에 대한 연구개발을 들 수 있다. 이는 그림 7에서 보듯 THz 광변조기를 개발할 수 있는 길을 열어주게 된다. 이것이 이론적으로 가능한 이유는  $h\nu - \hbar\omega$ 간의 위상전이율이  $v-c$ 간의 밀도전이율보다 훨씬 크기 때문이다. 다만, 예측가능한 문제는 따라서 검은공진에 의해 유도된 두양자결맞음의 세기가 약하게 되며 이것은 곧 4파장섞음파의 생성에 결정적으로 영향을 주게 되어 Na에서 보였던 증폭은 기대할 수 없을지도 모른다는 사실이다. 물론 약한 두양자결맞음을 보상하기 위해서는 펄스레이저의 세기를 크게 하면 될 것이나 이럴 경우 너무 큰 세기의 빛이 반도체에 작용하게 되므로 선풍넓어짐의 부작용은 물론 예측하지 못한 새로운 현상이 발생할 수도 있다는 점이다. 결론적으로 양자변조기 연구의 의미는 현재 광스위칭 소자기술의 한계인 밀도전이시간을 극복하고 지금보다 10-100배 이상 변조대역폭을 확장시킬 수 있다는 데 있다.

### 다. 반도체를 이용한 양자스위치 연구개발

양자스위치 연구개발은 앞서 설명한 대로 기저상태에 3개

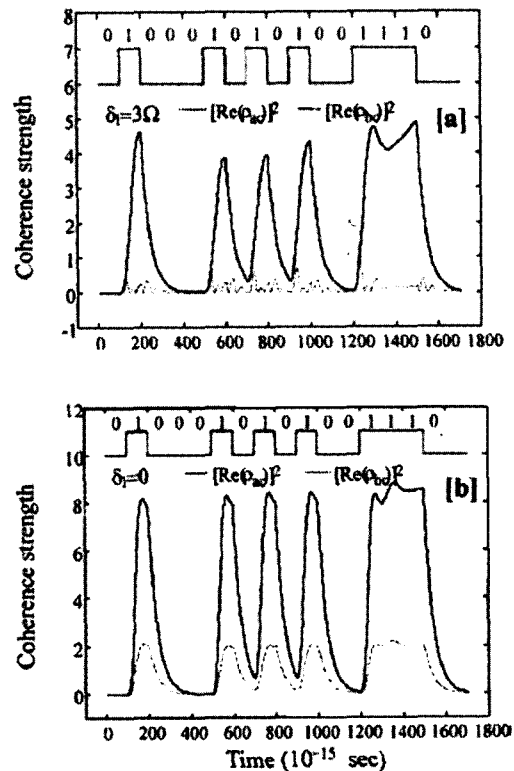


그림 7. 반도체 물질의 특성을 고려한 10 THz 양자스위치 수치계산

의 에너지 준위가 필요로 하므로 커플링을 통한 에너지 준위 조정이 필요하다. 이를 위해서는 conduction band의 intersubband 전이를 이용하면 되는데 통신주파수에 해당하는 적당한 물질이 없어 연구를 진행하는 데 있어 어려움이 있다. 현재까지 본 연구단에서 행한 이론적인 연구로는 반도체 intersubband 전이를 이용할 경우 그림 7에서 보듯 10THz 양자스위칭이 가능함을 입증하였다<sup>(6)</sup>. 또한 앞서 설명했듯이 시간축 뿐만 아니라 공간축에서 광스위칭이 가능하여 양자라우팅을 할 수도 있게 되는데 이를 확장하면 홀로그래피에서처럼 두양자결맞음의 공간중첩이 가능하여 병렬처리를 할 수 있다는 점이다. 따라서, 양자스위칭의 연구개발은 10THz 광스위칭 속도를 중첩원리에 의해 10배 이상 확장할 경우 Pbps전송용량을 단 한 개의 양자스위칭을 통해 할 수 있게 되어 현 광통신 교환부를 혁명적으로 개편하는 결과를 가져오게 될 것이다. 본 연구단 연구개발 계획서에는 반도체에서의 양자스위칭 연구는 2단계 즉 2003년 10월 이후로 예정되어 있다.

## 5

이상 본 연구단에서 하고자 하는 연구를 1단계 처음 3년간에 집중하여 대략적으로 설명하였다. 다행스럽게도 본 연구단에서 제안한 양자스위칭에 대한 이론적인 연구와 그 실험적 검증은 이미 회도류를 사용하여 완전하게 증명하였다. 이제 남은 문제는 반도체에서의 검은공진현상에 대한 증명인데 이는 반도체 구조성장과 관계가 있으므로 국내외 타 연구기관과의 긴밀한 연구협력을 통해 달성하게 될 것이다.

## 6

(1) G. Alzetta et al., Nuovo cimento soc. Ital. Fis. 36B, 5 (1976); S. E. Harris, Physics Today 50(7), 36 (1997).  
 (2) Y. Zhao et al., Phys. Rev. Lett. 79, 641 (1997); B. S. Ham et al., Opt. Lett. 22, 1138 (1997).  
 (3) J. Faist et al., Nature 390, 589 (1997); G. Serapiglia et al., Phys. Rev. Lett. 84, 1019 (2000).  
 (4) P. R. Hemmer et al., Opt. Lett. 20, 982 (1995).  
 (5) B. S. Ham and P. R. Hemmer, Phys. Rev. Lett. 84, 4080 (2000).  
 (6) B. S. Ham, Appl. Phys. Lett. 78, 3382 (2001); ibid, ETRI J. 23, 96 (2001).