

포토닉스 컴퓨터: 차세대 반도체를 찾지 못하면?

Photonics Computer: If We Do Not Find the Next of DRAM?

박상기 (S.G. Park) 미래기술전략연구실책임연구원

각종 통계자료에 근거하여 반도체산업이 국가 전체 산업에 차지하는 비중과 경쟁국가, 경쟁 기업들의 성장·쇠퇴 과정을 고려하면 ‘차세대 반도체 못 찾으면?’이라는 질문은 10년 뒤 국가경제의 사활이 걸린 문제일 수 있다. 세계 반도체 선두그룹의 연구개발 방향과 최근 연구성과를 분석함으로써 차세대 반도체를 유추한다. 유력한 해답 중 하나가 포토닉스 시스템 반도체라고 한다면 이를 구현하기 위한 우리의 연구방향과 핵심기술에 대해 논의한다.

2014
Electronics and
Telecommunications
Trends

창조경제 시대의 기술·시장
전망 특집

- I. 서론
- II. 포토닉스 연구
- III. 실리콘 광도파로
- IV. SiN 광도파로
- V. 결론

1. 서론

최근 반도체 관련 뉴스 중 관심을 끄는 두 기사를 소개하면 다음과 같다. 첫 번째는 ‘차세대 반도체 못 찾으면?’ 제목의 중앙일보 2013년 7월 26일자 기사다[1]. 2007년부터 시작된 D램 분야의 ‘치킨 게임’이 끝나면서 D램 가격은 빠르게 회복되고 있고 자금력과 기술력이 부족한 기업은 호황의 혜택을 누리지 못하고 파산하는 반면 세계 시장점유율 1, 2위인 삼성전자와 SK 하이닉스는 매출과 영업이익이 증가하고 시장점유율이 확대되고 있다는 소식과 함께 장래에 파산한 기업과 같은 위기를 맞지 않기 위해서는 차세대 반도체를 찾아서 투자를 해야 한다는 뉴스이다. 두 번째는 ‘韓, 사상 처음으로 日 제치고 세계 반도체 시장 점유율 2위 등극’ 제목의 조선일보 2014년 1월 20일자 뉴스다[2]. 산업통상자원부는 반도체협회와 시장조사기관 아이서플리 등의 조사결과 우리나라가 일본을 제치고 반도체 생산액 기준 세계시장 점유율 2위에 등극할 것이 유력하다고 밝혔으며 우리나라는 메모리가 2010년 49.8%에서 2013년 52.7%로 시스템 반도체는 2.9%에서 5.0%, 광개별 소자는 7.4%에서 10.4%로 각각 상승한 반면 일본은 20대 반도체 기업 중 2009년 6개에서 2013년 3개로 줄어들었고 세계시장 점유율도 1988년 51%, 1993년 40%에 달했으나 2012년에는 13.9%로 격감한 바 있다는 뉴스다.

우리나라는 삼성전자의 활약과 더불어 메모리 반도체 분야 세계시장 점유율 및 기술력이 10년 이상 세계 최고를 유지해옴으로써 위 두 뉴스는 크게 주목 받지 못하고 흔히 접하는 평범한 뉴스로 취급되고 있으나 각종 통계자료에 근거하여 반도체산업이 국가 전체산업에 미치는 비중과 경쟁국가, 경쟁기업들의 성장·쇠퇴 과정을 고려하면 ‘차세대 반도체 못 찾으면?’ 이라는 질문은 10년 뒤 국가경제의 사활이 걸린 문제일 수 있다. 반도체 산업에서 우리나라가 일본을 추격하는 속도보다 빠른 속도로 중국이 우리나라를 추격하고 있다. 한·중 품목

별 세계수출시장 점유율을 보면 전자부문에서 2000년 한국 4.9%, 중국 4.9%로 이었으나 2011년 한국 9.8%, 중국 37.1%으로 약 4배 가까이 격차가 난 상태다[3]. 이는 타 품목에 비해 가장 큰 수치이다.

2009년 우리나라 전체 수출액 중 주력산업인 자동차, 조선, 철강, 화학, 섬유 등을 합한 비중이 51.6%인 반면 IT 산업이 차지하는 비중은 33.3%으로 IT 의존도가 높다[4][5]. 우리나라 IT 산업은 3개 제품, 메모리 반도체(25%), 휴대폰(25.5%), 평판디스플레이(19.6%)이 IT산업 수출액의 70.1%을 차지하며 각각 세계시장 점유율 1위를 달리고 있다[5]. 기술적으로는 평판디스플레이와 휴대폰 기술이 반도체기술을 기반으로 하고 있으므로 반도체기술이 우리나라 IT 산업을 지배한다고 할 수 있다.

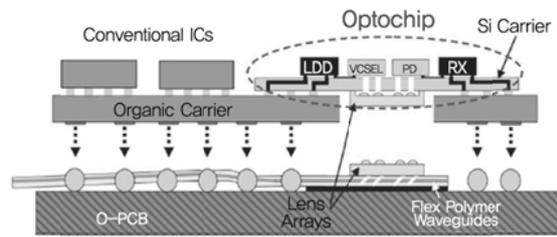
전세계 반도체 시장규모는 2010년 기준 \$3,040억(약 300조원)이며 이중 메모리 반도체 \$673억(약 67조원), 시스템 반도체 \$1874억(약 187조원)으로 약 1:4의 비율을 나타낸다[6]. 우리나라는 2013년 생산액 기준 세계 2위 반도체국가로 성장하였으나 메모리 반도체에 지나치게 의존하고 있으며 시스템 반도체에서는 대만보다 경쟁력이 낮은 실정이다. 2010년 세계 반도체시장에서 우리나라의 점유율은 \$410억으로 약 13.5%에 불과하다. 미국은 반도체 전체 시장(점유율 48.2%)뿐만 아니라 시스템 반도체 시장의 절대강자로 점유율 64%를 차지하고 있다. 여기서 우리는 질문 ‘차세대 반도체 못 찾으면?’의 해답을 구할 수 있는 열쇠를 엿볼 수 있다.

첫째는 물론 시스템 반도체다. 두 번째는 미국의 반도체 선두회사인 IBM과 인텔의 연구개발 방향과 최근 연구성과를 추적하는데 있다. CPU에서 발생하는 열은 이미 로켓노즐의 열밀도에 다다랐다. 전력소모를 줄이기 위해서는 단일 CPU 코어의 처리속도를 증가시키는 것은 효과적이지 못하며 2000년대 중반부터 코어의 속도(Clock rate)를 2~3GHz로 유지한 채 코어의 개수를 증가시키는 방향으로 나아가고 있다. 당연히 던지는 질문

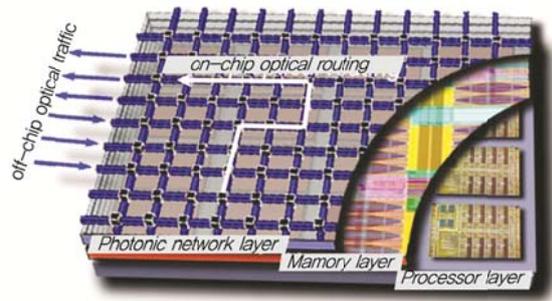
은 ‘코어의 개수를 몇 개까지 증가시킬 수 있는가?’ 이다. 현재 개인용 컴퓨터는 4~8개의 코어가 전기신호로 연결되어 있고 페타플랍급 슈퍼컴퓨터는 수백만 개의 코어가 광신호로 연결되어 있다. 2000년 대 초 중반 이후 인텔, IBM, 선마이크로시스템, Luxtera, TI, HP 등 미국의 반도체회사들은 코어와 코어, 코어와 메모리, 코어와 I/O 간 신호를 광신호로 연결하기 위해 연구역량을 집중하고 있으며 미국 정부 역시 DARPA, DOE, Army 등을 통해 수천억 대의 연구비를 지원하고 있다. 따라서 차세대 반도체를 찾기 위한 가장 유력한 해답 중 하나는 컴퓨터 내 광신호 도입을 위한 포토닉스 시스템 반도체라고 할 수 있다.

II. 포토닉스 연구

컴퓨터에 광신호를 도입하기 위한 연구는 크게 3부분으로 구분할 수 있다. 첫째는 광섬유 케이블을 사용하여 슈퍼컴퓨터의 Rack to Rack, Board to Board를 연결하는 연구이다[7]. 하나의 광섬유 리본에 많은 가닥을 집적하고 각 가닥(채널)을 통하는 통신속도를 현재 보편적으로 사용되는 10Gbps에서 40Gbps 또는 그 이상으로 높이하고자 하며 채널당 제작 비용을 현재 \$100 수준에서 최대한 낮추기 위한 연구가 진행되고 있다. 현재 제작되는 페타플랍급 슈퍼컴퓨터 1대에 수백만 개의 광섬유 채널이 사용되고 있다. 둘째는 개인용컴퓨터나 슈퍼컴퓨터의 PCB 보드 내 칩 간(네트워크온보드: Networks on board) 신호를 광신호로 연결하기 위한 연구이다[8]. (그림 1)과 같이 850nm 파장의 표면 방출 레이저와 포토다이오드를 사용하여 PCB 보드에 삽입된 광섬유 또는 폴리머 광도파로에 광신호를 접속하는 연구를 한다. 1990년대 중 후반부터 연구되고 있으나 아직 슈퍼컴퓨터에 적용되지 못하고 있다. IBM은 2009년 자사 제작 슈퍼컴퓨터에 2016년부터 도입한다는 계획을 발표한바 있으나 늦어질 가능성이 크다. 다채널 광섬유



(그림 1) IBM의 네트워크온보드



(그림 2) IBM의 네트워크온칩

케이블을 PCB 보드 위에도 계속 사용할 전망이다.

셋째는 실리콘 칩 위에 다수의 코어와 메모리칩을 집적하고 코어간 또는 코어와 메모리 간(네트워크온칩: Networks on chip) 광신호를 연결하는 연구이다. 2000년대 중반 이후 실리콘포토닉스란 명칭으로 크게 주목을 받으며 미국뿐만 아니라 유럽, 중국, 한국, 등에서 경쟁적으로 연구되고 있는 분야이다. 그러나 상용화 가능성과 시기에 대해 초기부터 회의적인 시각을 보인 연구 그룹도 있다. IBM은 2020년경 네트워크온칩(그림 2) 참조)기술을 자사 슈퍼컴퓨터에 도입한다는 계획을 2009년 제시한 바 있으나 그 가능성은 높지 않다.

이상 3개의 기술 부분 중 첫 번째 기술 부분은 가입자망 광섬유 광통신 기술과 거의 동일하며 국가 간 기술격차가 크지 않고 국내 기술수준 역시 미국과 큰 차이가 없다. 이 기술은 슈퍼컴퓨터에 포토닉스 기술이 이미 도입된 사실을 보여준다. 그러나 개인용 컴퓨터나 스마트폰, 등에 적용되기 어렵고 시장 규모도 2012년 기준 1조 미만으로 크지 않다. 두 번째 기술 부분은 IBM이 가

장 역점을 두고 연구하고 있는 분야로 슈퍼컴퓨터에 적용될 경우 광비용(Optics cost)이 전체 슈퍼컴퓨터 가격의 약 20%를 차지할 것으로 예측한 바 있다.

포토닉스 시스템 반도체와 가장 근접한 연구는 세번째 기술 '네트워크온칩'이라 할 수 있다. 이는 실리콘(Si) 반도체 물질을 광도파로로 사용하는 것이 특징이다. CPU, DRAM 등과 같은 물질을 사용하므로 광소자와 전자소자를 동일한 웨이퍼에 집적할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 실리콘포토닉스 연구에 많은 지원을 이끌어내는 설득논리로 사용되었다. 2005년 코넬대 Lipson 교수팀이 광신호를 발생시키는 광변조기를 원형고리 모양의 실리콘 링 공진기로 제작하고 1.5 Gbps 광변조 특성을 네이처지에 보고하였다. 전자소자와 동일한 물질로 광신호를 발생시킬 수 있다는 사실이 기폭제가 되어 실리콘포토닉스 연구가 크게 활성화 되었다. IBM은 네트워크 온 칩이 슈퍼컴퓨터에 적용될 경우 광비용이 전체 슈퍼컴퓨터 가격의 약 40%를 차지할 것으로 예측한 바 있다. 즉 광비용이 메모리와 CPU의 합과 비슷한 가격이 된다는 것을 의미한다. 미래의 개인용컴퓨터와 스마트기기에 광신호가 도입된다고 가정하고 동일한 비율을 적용할 경우 포토닉스 시스템 반도체 시장 규모는 현재 메모리와 시스템 반도체의 합(2010년 약 300조원)과 비슷한 규모임을 추산할 수 있다.

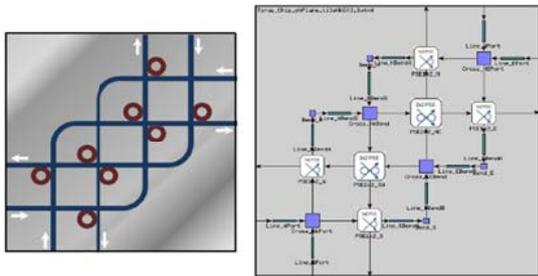
III. 실리콘 광도파로

실리콘포토닉스는 전세계 연구 그룹 중 미국의 기업과 대학교가 가장 적극적이고 우수한 성과를 보고하고 있다[9][10]. 대표적으로 IBM, 인텔, Luxtera, 선마이크로시스템 등 기업과 MIT, Cornell 대학, Columbus 대학, UC at Santa Barbara 등을 들 수 있다. 미국정부 역시 DARPA, DOE, 등을 통해 IBM(\$45M, 2003~2007), 선마이크로 시스템(\$44.29M, 2008~2.13) 등의 과제에

수천억을 지원하고 있다. 유럽연합은 실리콘포토닉스 과제 연합(European Silicon Photonics Cluster, 10개 과제연합, \$36M)을 통해 지원하고 있으며 영국, 프랑스, 벨기에 등이 주도적으로 연구하고 있다. 중국은 국가의 지원규모가 파악되고 있지 않으나 국제학회 및 전시회에 참여하는 인원, 논문, 전시부스 등으로 미루어 볼 때 미국 다음으로 가장 적극적임을 알 수 있다. 현재 전세계 상위 500개 슈퍼 컴퓨터 중 1위는 연산 속도 33.86페타플롭스의 중국 Teanhe-2(텐허2호)이다. 한국은 ETRI에서 2006년부터 30~42억/년 규모의 연구를 진행하고 있고 삼전전자는 2009년부터 연구팀을 조직하여 연구하고 있으며 KAIST, 인하대 등에서도 이에 관한 연구를 하고 있다.

기술적으로 3~5년 내에 도달할 수 있는 기술(예: 광변조기, 광검출기, 광다중화기 등)은 국가별로 거의 평준화된 상태이며 ETRI에서도 위 소자 중 일부 특성에서 세계 최고를 보고한 바 있다[11]. 그러나 시간이 많이 소요되거나 난이도가 높은 원천형 기술(예: 화합물반도체와 실리콘 반도체의 접합 레이저, 네트워크온칩 설계, 등)은 미국의 독주 상태이다.

실리콘 물질의 광도파로를 기반으로 하는 실리콘포토닉스는 지난 10여 년간 활발히 연구되어 왔지만 원래의 목표인 '다수의 코어와 메모리 칩을 하나의 실리콘 칩에 집적하고 광신호로 연결한 네트워크온칩'이 상용화 수준에 도달할 수 있는가, 있다면 언제쯤이 될까에 대해서는 냉정히 되돌아 볼 필요가 있다. 네트워크온칩 설계의 대표적인 논문은 Columbia 대학의 Bergman 그룹과 선마이크로시스템의 Krishnamoorthy 그룹에서 게재한 논문을 들 수 있다[12][13]. 각 연구자는 광원, 변조기, 스위치, 검출기가 필요한 성능에 도달한다는 가정 하에 이론적 관점에서 설계하였지만 실제 각 소자의 성능은 크게 미달하고 있다. 난제 중 하나는 기술이 진보해도 쉽사리 극복이 되지 않는 실패율의 통계적 분포이다. 예



(그림 3) Columbia 대학의 네트워크온칩 광스위치

를 들어 네트워크를 구성하기 위해서는 광스위치가 필요하며 모든 설계는 (그림 3)과 같이 실리콘 링공진기를 광스위치로 이용한다. 링공진기의 공진파장은 설계파장에 대해 통계적 분포에 따라 벗어나게 되며 실리콘 물질의 특성상 모든 링공진기의 공진파장을 설계파장의 규격 내에 맞추는 것은 통계적으로 불가능하다. 또한 Krishnamoorthy 그룹에서 제시한 설계에 따르면 64개 코어를 광신호로 연결하기 위해서는 약 4,000개의 반도체 레이저를 실리콘 칩 위에 집적하여야 한다. 4,000개의 레이저 파장을 각각 해당 광스위치와 일치시키는 것은 역시 통계적 분포에 따라 불가능하다. 뿐만 아니라 레이저의 제작에 따른 실패율과 작동에 필요한 소모 전력을 계산하면 현실성이 없는 이론적 설계라는 결론에 다다른다.

실리콘 광도파로의 전송손실(1.7dB/cm)과 현재 보고된 최고 특성의 검출기 감응도(Sensitivity: 10dBm at 15Gbps)를 비교하면 더욱 비관적이 된다[8]. 즉 통상 사용하는 광신호 세기에서 최대전송 거리는 전송속도 15Gbps에 대해 5cm 미만, 20Gbps에 대해 1.2cm 미만이 된다. HP사의 Ray Beausoleil은 국제학회 Photonics West 2009, Plenary talk에서 실리콘포토닉스 기술은 공진파장의 통계적 오류를 극복하기 어려워 실현가능성이 낮다고 주장한 바 있다. 이는 여전히 유효하며 시간이 지날수록 사실로 입증될 가능성이 커지고 있다.

IBM은 네트워크온보드 연구에 높은 비중을 두고 있고 네트워크온칩에 대해서는 원천기술 위주의 소규모

연구를 수행하고 있다. 인텔과 Luxtera도 완전한 기능의 네트워크온칩을 구현하기보다 광원, 변조기, 검출기 등 광소자를 주로 연구하며 자사에서 확보한 기술을 활용하여 4채널, 50/100Gbps의 광커넥터를 개발한 바 있다[9][10].

IV. SiN 광도파로

원점으로 돌아가서 차세대 반도체를 찾기 위한 가장 유력한 해답은 포토닉스 시스템 반도체라는 주장에 동의하면 이를 구현하기 위한 핵심기술이 무엇이고 누가 어떻게 연구를 수행하여야 하는지를 고찰할 필요가 있다. 전술한 바와 같이 IT 산업이 국가 전체 산업에서 차지하는 비중과 IT산업에서 반도체가 차지하는 비중을 고려할 때 이에 대한 결론은 한국과 일본의 관계처럼 10년 뒤 한국과 중국의 반도체산업의 위상이 걸린 중요한 문제일 수 있다.

포토닉스 시스템 반도체를 구현하기 위한 연구로서 실리콘(Si) 물질의 광도파로를 기반으로 하는 실리콘포토닉스 연구는 근접하기는 하나 전술한 바와 같이 실현 가능성이 있는 연구라고 할 수는 없다. 만약 각국이 경쟁하는 현재 방향의 실리콘포토닉스 연구가 실패로 돌아간다면 우리나라에게는 오히려 다행한 결과라 할 수도 있다. 승자가 전체를 독식하는 반도체산업의 특성상 연구단계에서 2, 3등의 연구결과는 1등을 도와주기만 할 뿐 결실을 공유하지는 못한다. 실리콘포토닉스에서 현재 우리의 연구역량은 미국과 비교할 수 없을 뿐만 아니라 중국과도 우위를 논할 수 없는 상태이다. 우리나라는 10년 이상 메모리 반도체 부분 세계 시장점유율과 기술력에서 부동의 1위를 유지하고 있다는 사실을 주지하고 미국이 최강인 시스템 반도체 부분에서 시장점유율과 기술력을 개척하고자 한다면 더 이상 모방하거나 추격하는 연구로는 불가능하며 미국을 능가할 수 있는 기술을 개척하고 그 기술이 시장을 창출하는 방향으로

〈표 1〉 포토닉스 물질의 특성(c-Si: Crystalline silicon, Poly-Si: Poly crystalline silicon, Si₃N₄: Silicon nitride, a-Si:H: Amorphous silicon)

Material	Propagation Loss	Electrically-Active	Deposit Capability	Stable	CMOS Compatibility
c-Si	1,7 dB/cm	Yes	No	Yes	Yes
Poly-Si	6,45 dB/cm	Yes	Yes	Yes	Yes
Si ₃ N ₄	0,1 dB/cm	No	Yes	Yes	Yes
a-Si:H	2 dB/cm	No	Yes	No	Yes

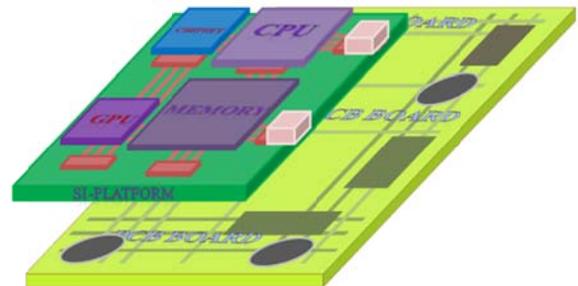
연구를 추진하여야 한다. 시스템 반도체에 포토닉스 기술이 융합되는 현시점이 적기라 할 수도 있다.

우리가 개척할 기술로 실리콘나이트라이드(SiN: Si₃N₄) 광도파로 기반 네트워크온칩 포토닉스 기술을 제안하고자 한다. 단 실리콘옥시나이트라이드(SiOxNy) 물질을 포함한다. 그 이유는 다음과 같이 분석할 수 있다. 첫째는 실리콘 반도체 소자를 제작하는 공정(CMOS Process)에서 광도파로 코어로 사용할 수 있는 물질은 실리콘(Si)과 실리콘나이트라이드(Si₃N₄) 단 두 개뿐이다. 옥사이드(SiO₂) 물질은 광도파로클레딩(광도파로 코어를 둘러싸는 외곽 부분)으로 사용한다고 가정한다. 실리콘(Si) 물질의 광도파로를 버릴 경우 대안은 당연히 실리콘나이트라이드 물질이다. 〈표 1〉에 나타난 바와 같이 광전송 손실은 실리콘 물질에 비해 실리콘나이트라이드 물질이 1/17로 우수하다.

둘째는 반도체 공정기술에서 세계 최고의 기술력을 보유한 우리나라는 실리콘나이트라이드 광도파로 기반 포토닉스 기술에서 경쟁국(특히, 미국)보다 우위를 차지할 수 있는 이점이 있다. 실리콘나이트라이드 물질은 전기적으로 능동적 특성이 없기 때문에 광변조기나 광스위치를 만들 수 없다. 이것이 실리콘포토닉스에서 실리콘나이트라이드 물질이 소외된 이유이기도 하다. 따라서 40Gbps까지 직접변조가 가능한 GaAs 물질의 표면 방출레이저를 사용하여야 한다. 광스위치를 사용하지 않으므로 네트워크는 일대일(Point to Point) 전송의 병렬 링크(Parallel Link)로 구성되어야 한다. 이때 네트워크 구조와 광송수신은 IBM이 역점을 두고 연구하는 네

트워크온보드와 동일하다. 다만 IBM은 PCB 보드와 폴리머 광도파로를 사용하는 데 비해 여기서는 실리콘 웨이퍼와 실리콘나이트라이드 광도파로를 사용한다는 점이 다르다. 이는 후자에게 많은 이점을 제공하며 실리콘 포토닉스의 네트워크온칩 강점을 많은 부분 공유하게 한다. 즉 광소자와 전자소자를 동일한 웨이퍼에 집적할 수 있고 반도체 표준 공정(CMOS Process)을 그대로 사용하여 제작할 수 있다. 또한 실리콘포토닉스에서 이중 접합 레이저와 네트워크온칩 설계기술은 미국의 독주 상태이나 실리콘나이트라이드 광도파로를 사용할 경우 이중 웨이퍼 접합 레이저 기술은 더 이상 사용되지 않으며 네트워크설계도 단순화 되어 미국의 기술적 우위가 크게 약화된다. 즉 기술의 경쟁력은 설계보다 공정에 의존하게 되고 공정에서 세계 최고 기술력을 보유한 우리에게 유리할 수 있다(그림 4) 참조.

셋째 실리콘(Si) 물질의 광도파로를 부정적으로 판단하도록 만든, 파장 오류 및 소자 Fail의 통계적 분포 그



(그림 4) 실리콘나이트라이드광도파로 기반 포토닉스 시스템 반도체(광전용합 PIC) 개념도, (PIC: Photonic Integrated Circuit)

리고 높은 전송손실은 실리콘나이트라이드 광도파로를 사용하는 네트워크온칩에서는 거의 무시하여도 된다. 실리콘 물질의 광도파로는 도파로 구조상 광원, 검출기, 변조기를 모노리식으로 제작하여야 하나 실리콘나이트라이드 광도파로는 양호한 광원과 검출기를 선택해서 광접속신호를 실시간 모니터링 하며 접합하므로(하이브리드 집적) 소자 Fail의 통계적 분포가 발생하지 않으며 소자가 Fail일 경우 즉시 교체 할 수 있다. 단, 하이브리드 집적의 특성상 패키지 비용이 높아질 수 있으나 소자의 실패율이 zero에 근접하지 않으면 모노리식 집적이 더 큰 비용을 초래한다. 또한, 광스위치를 사용하지 않는 일대일 통신의 병렬링크이므로 파장오류가 존재하지 않는다. 그리고 전송손실 역시 실리콘 도파로의 1/17로 낮다.

V. 결론

유력한 차세대 반도체가 포토닉스 시스템 반도체이고 이를 구현하기 위한 기술이 실리콘나이트라이드 광도파로 기반 포토닉스 기술이라 하면 개발해야 할 핵심기술은 다음과 같이 꼽을 수 있다. 광원과 광도파로, 검출기와 광도파로간 저비용 대량생산 가능한 광접속기술, 접속손실과 전송손실을 최소화 할 수 있는 광도파로, 광소자와 전자소자를 동일한 웨이퍼에 집적하기 위한 집적 기술 등이다. 포토닉스 기술이 시스템 반도체에 적용되어 시장에 나오기까지는 최소 5~10년 이상 소요될 수 있으므로 단일 기업이 독자적으로 기술을 개발하기는 어렵다. 미국의 경우 2000년대 초반부터 수천억의 연구비를 IBM, 인텔, 선마이크로시스템 등에 지원하고 있음을 고려할 때 우리나라도 정부의 더 적극적이고 과감한 투자가 필요하다고 할 수 있다. 가장 효율적인 연구를 위해 실리콘나이트라이드 광도파로 기술과 특허를 다수 보유하고 있는 ETRI와 최고 수준의 공정기술을 보유한

삼성의 공동연구를 제안해 볼 수 있다. 또한 필요할 경우 IBM, 인텔과도 사업화 역할 분담을 통한 공동연구를 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 중앙일보, “차세대 반도체 못 찾으시면? 또...태평양대 속 치열한 개발 경쟁,” 2013. 7. 26.
- [2] 조선일보, “韓, 사상 처음으로 日 제치고 세계 반도체 시장 점유율 2위 등극,” 2014. 1. 20.
- [3] “산업융합원천 R&D 전략[2013-2017]-신산업,” 한국산업기술평가관리원, 2012. 9. p. 13.
- [4] “The next big thing!-대한민국 산업-기술 비전 2020-주력산업,” 지식경제부, 2010. 11, p. 9.
- [5] “The next big thing!-대한민국 산업-기술 비전 2020-정보통신,” 지식경제부, 2010. 11, p. 12.
- [6] “2011 산업기술로드맵-반도체,” 한국산업기술연구원 2012. 3.
- [7] Fuad E. Doany et al., “Terabit/Sec VCSEL-Based 48-Channel Optical Module Based on Holy CMOS Transceiver IC,” *JLT*, vol. 31, no. 4, Feb. 4th, 2013, pp. 672-680.
- [8] Fuad E. Doany et al., “Terabit/s-Class Optical Pcb Links Incorporating 360-Gb/s Bidirectional 850nm Parallel Optical Transceivers,” *JLT*, vol. 30, no. 4, Feb. 15th, 2012, pp. 560-571.
- [9] A. Alduino et al., “Demonstration of a High Speed 4-Channel Integrated Silicon Photonics WDM Link with Hybrid Silicon Lasers,” *IPRSN*, July 25th, 2010.
- [10] REUTERS, “Luxtera Delivers World’s First Single Chip 100Gbps Integrated Opto-Electronic Transceiver,” Nov. 8th, 2011.
<http://www.reuters.com/article/2011/11/08/idUS145866+08-Nov-2011+BW20111108>
- [11] S. G. Park et al., “Si micro-ring MUX/DeMUX WDM filters,” *Optics Exp.*, vol. 16, no. 14, 2011, pp. 13531-13539.
- [12] Keren Bergman, “Physical Layer Design of Nanoscale Silicon Photonic Interconnection Networks,” *Proc. SPIE 2009*, Feb. 17th. 2009.
- [13] A. V. Krishnamoorthy et al., “Computer Systems Based on Silicon Photonic Interconnects,” *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 7, July 2009.