

## 1. 서론

빠른 데이터 전송/처리, 최소화된 field interference, 넓은 가용파장 등을 잇점으로, 광 데이터 처리에 대한 수요는 폭발적으로 증가하고 있으며, 여기에서 요구되는 광소자와 이를 구성하는 소재에 대한 연구 또한 급속한 발전을 해 왔다. 특히, 광학적 이방성 결정을 사용한 초고속 광 데이터 처리 소자의 경우, 큰 체적과 광도파로와의 연계성, 그리고 경제성 등의 미해결 문제가 남아 있기는 하나, 동작 특성에 있어서는 괄목할만한 성장을 이루었다. 기존 문제점의 해결과 더욱 업그레이드 된 기능을 기반으로 광섬유 소자에 대한 관심이 높아졌고, 이로 인해 높은 기능성과 안정성, 경제성, 그리고 운용성 등이 구현될 수 있게 되었다. 그러나, 불행히도, 기존의 광섬유 기반 광소자의 경우, 이방성 결정의 부분적 사용이나

에 의한 모드 잠김 (mode-locking) 현상에 기초 하게 되며, 이후로 초고속 펄스 레이저의 다양화가 진행되어, 현재는 반도체 기반의 펨토초 레이저 못지 않은 품질을 자랑하고 있다. 또한, SWNT는 mode-locking뿐 아니라 비선형 스위칭에서도 기능을 발휘하게 되는데, Kerr 스위칭, four-wave-mixing (FWM) 등의 고속 현상에 대한 실험적 성공이 보고 되어 [2-5], 이러한 광섬유 기반의 나노카본 소자가 기존의 광섬유 소자를 대체 할 수 있는 가능성을 열어 주었다. 2009년에는 처음으로 그래핀 (graphene)을 기반으로 하는 펨토초 레이저가 등장하게 되는데, 이는 SWNT에 비하여 더 넓은 동작 스펙트럼과 더 빠른 동작 시간을 갖는 것으로 보고가 되어 나노카본 초고속 소자의 수준을 한층 더 높여 주었고 [6,7], 공정 (preparation process) 면에 있어서도 더 높은 효율의 새로운 공정들이 소개되고 있다.

# 특집 ■ Graphene and Carbon nanotube

## 광섬유 기반 나노카본 비선형 소자

김원준, 송용원\*

free-space optics와의 hybrid, 그리고 optics/electronics 변환에 대한 필요성은 아직 간과하기 힘든 실정이다.

최근, 높은 광학적 비선형성을 가진 나노물질의 도입으로 인해, 광섬유 기반의 소자들이 갖는 문제점을 해결하려는 시도가 2003년을 기점으로 활발하게 진행 되었다. 특히, 반도체의 단일벽탄소나노튜브 (single-walled carbon nanotube; SWNT)의 기능을 기반으로 하는 초고속 펨토초 (femto-second) 레이저의 개발이 성공적으로 이루어졌는데 [1], 이는 이러한 나노카본 물질의 광학적 비선형성인 비선형 포화흡수 (saturable absorption)

본 글에서는, 나노카본 물질의 구조적, 기능적 이해와, 이를 이용한 광섬유 기반의 초고속 광학 소자를 소개하고, 또한 이들의 기능 및 공정 효율의 증가를 위한 최근 개발 내용을 알아보려고 한다.

## 2. 나노카본의 광학적 비선형성

일반적으로 탄소물질은 다이아몬드, 흑연, 비정질 카본 등으로 다양하지만, 특히, hexagon 구조의 long-range order를 유지하고 있는 플러린 (fullerene), SWNT, 그

\* 한국과학기술연구원

## 광섬유 기반 나노카본 비선형 소자

래핀 등은 광학적 비선형성을 갖는 것으로 보고가 되고 있다. 특히, 이러한 비선형성의 정량적인 값은, SWNT의 경우 일반 비정질의 실리카 (광섬유의 일반적인 구성 물질)에 비해 이론적으로 10<sup>6</sup>배 정도가 높은 것으로 보고가 되고 있으며, 광소자에서 요구되는 비선형성이 동일할 경우 기존 광소자보다 10<sup>6</sup>배의 제원 축소가 가능함을 의미한다. 주목할만한 점은, 이러한 동작이 나노카본에서는 상당히 빠른 시간에 일어난다는 점이다. 발표된 바에 의하면, recovery time이 200 ~ 500 fs정도가 되는데, 이는 나노카본 내부와 나노 구조 상호간 모두에서의 빠른 전자 전이시간에서 비롯되는 것으로 이해되고 있다.

탄소 원자가 모여 이루는 육각형의 구조가 2차원적으로 펼쳐진 모양이 그래핀이라면, 이 그래핀을 특정 방향(chirality)으로 원통형으로 말아서 만든 나노구조가 SWNT가 되며, 이 SWNT의 끝부분이 서로 만날정도로 짧은 형태가 풀러린이라고 연상하면 될 것이다. 이들 나노카본 구조들은 독특한 에너지 밴드구조를 갖게 되는데, 이 밴드구조는 나노 결정 격자가 같은 기계적 스트레스(chirality 포함), 화학적 결합성분, 불순물(도핑, defect, surface functional group 등) 종류와 농도, 크기와 morphology 등의 함수가 되어 반도체/금속성이 결정되게 된다.

일반적으로 반도체 SWNT는 약 0.8 eV의 에너지 밴드갭(~1.2 nm의 직경일 경우)을 갖게 되어, 이 이상의 에너지를 갖는 포톤이 입사될 경우 흡수를 하게 되며, 그래핀의 경우 흔히 k-point라 불리는 곳에서 point 밴드갭을 갖게 되어, 더 낮은 에너지를 갖는 포톤도 흡수가 가능하게 된다. 이들 나노카본에서 포톤을 흡수하여 여기되는 전자들은 Dirac-Fermion의 특성을 갖게 되는데, 빠른시간에 포논등으로의 커플링으로 인해 에너지를 잃게 되면서 '냉각'되어 conduction band의 edge 부분에서부터 높은 에너지 쪽으로 점점 채워지게 된다. 이어서 입사되는 포톤으로 여기되는 전자가 이미 채워진 전자와 충돌을 할 경우에는 Pauli 배타원리에 의해 다른 자리를 찾게 되고, 이 과정에서 자리가 없게 되면 포톤을 흡수하지 못하고 통과시키게 되는데, 이것을 포화 흡수(saturable absorption)라고 한다. 따라서, 낮은 에너지의 입사광은 흡수를 하게 되고, 반대로 일정 threshold 이상의 높은 에너지를 갖는 입사광은 통과를 시키게 된다.

SWNT나 그래핀의 경우에 있어서는 격자구조에서

inversion symmetry (symmetry point를 기준으로 180° 되는 곳의 동일 원자의존재)를 갖게 되므로, 2차 susceptibility,  $\chi^{(2)}$ , 는 무시되고 3차 성분( $\chi^{(3)}$ )만 갖게 되는데, 이 것이 비선형 포화 흡수와 Kerr effect와 직접적으로 연관 되며, 흡수계수( $\omega$ ), 굴절율( $n$ ), 그리고  $\chi^{(3)}$  간의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s} + \alpha_{int} \\ &\sim \alpha_0 + \alpha_{int} - \alpha_0 \frac{I}{I_s} \\ &= \alpha_0 + \alpha_{int} + \frac{3\omega \text{Im}(\chi^{(3)})}{2\epsilon_0 c^2 n_0^2} I \\ n &= n_0 + n_2 I = n_0 + \frac{3\text{Re}(\chi^{(3)})}{4\epsilon_0 c n_0^2} I \end{aligned}$$

여기서,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_{int}$ ,  $n_0$ 는 각각 선형흡수계수, 비포화흡수계수, 굴절율을 나타내며,  $I$ ,  $I_s$ ,  $\omega$ ,  $n_2$ 는 각각 광학 intensity, 포화 intensity, optical angular frequency, 비선형 굴절율을 나타낸다 [8]. 식에서 제시된 intensity와 흡수와의 관계를 그림 1에 정리 하였는데, 이 개념도에서는 나노카본에서 일반적으로 보여지는 비선형 흡수의 이해를 SWNT 경우를 들어 설명 하였다. SWNT의 흡수 스펙트럼은 band-to-band 흡수의 가장 큰 피크( $S_1$  peak)를 보이게 되는데, 이 피크는 두가지 영역으로 구분되게 되며, 선형 흡수와 비선형 흡수가 그것들이다. 선형 흡수는 탄소 원자의 밀도와 직관되며, 비정질 카본이나 금속 카본의 경우에 있어서도 동일한 흡수 정도를 갖게 된다. 반면, 비선형 흡수는 반도체 나노카본에 의한 흡수로 optical intensity의 함수가 되게 되는데, 이러한 나노카본 물질에 입사되는 intensity를 변화하게 되면, 선형 흡수량은 일정값을 유지 한 채 비선형 흡수량이 변화하게 된다. 그림에서는 텔레콤에서 사용되는 1550 nm의 파장에서 intensity의 변화에 따른 비선형 흡수의 변화를 도식화 하였고, 실제로 이러한 변화는 z-scan을 통해, 또는 광섬유 커플러(coupler)의 두 branch에서 나노카본의 유무에 따른 power비교를 통해 알아 낼 수 있게 된다. 실제로 보고된 흡수도의 modulation은 SWNT가 수십 %까지 가능하나, 그래핀의 경우 2~3 % 수준에 머물러 있다.

그래핀의 경우에 있어서는, 포인트 밴드갭의 특성으로

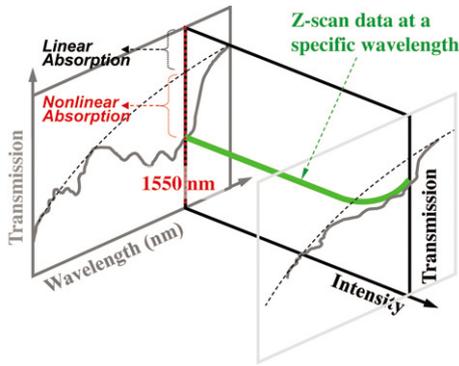
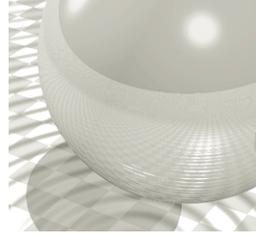


그림 1. SWNT에서의 비선형 흡수 현상의 개념도.

인해, SWNT와 같은 양상의 피크들을 보이는 대신 단순한 하나의 넓은 피크를 보이게 된다. 따라서 SWNT가 담당할 수 없는 파장영역까지 동작 가능성을 제시 할 수 있게 된다. 짧은 파장에 근접할수록 점점 투과도가 줄어들게 되는데, 이것은 고유 공명 주파수에 대한 근접과, 표면 contamination 상태에 따른 결과로 해석 된다. 그래핀의 경우에는 몇층이 겹쳐져 있는 다층 그래핀도 위의 광학적 비선형성을 갖게 된다. 따라서 비선형 소자의 제작을 위해서는, 굳이 제조가 어려운 단일층 그래핀이 필요한 것은 아니며, 다층 그래핀의 경우는 SWNT의 공정과 비교하여 많은 잇점을 갖게 된다.

레이저 공진기 내에 이러한 포화 흡수체를 삽입하게 되면, 모드잠김 (mode-locking) 현상이 수동적으로 발생하게 된다. 공진기 내에서는 자연적인 intensity fluctuation이 존재하고 여기에서 발생하는 순간 intensity의 변화가 포화 흡수체의 threshold 바로 위/아래에서 이루어 진다면, 포화 흡수체에 흡수되는 모드와 통과되는 모드가 나뉘게 되고, 통과되는 모드와 상대적으로 상 (phase)이 서로 일정하게 잠긴 정렬된 (synchronized) 모드들만이 살아 남으면서 time-domain에서 주기적인 전체 보강간섭 (all constructive interference)이 생겨나게 되어 펄스를 형성하는 것이다. 실제로, 이러한 모드 잠김이 생겨났을 때, wavelength domain에서 관찰된 스펙트럼을 보면, 수학적으로 Fourier transformation된 형태와 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서, 두 domain에서의 데이터를 관찰하고 연관 분석하여, 수학적인 변환 인자 이외에 다른 요소들을 찾아내어 추가적인 특성을 제어하는 연구는 초고속 펄스 레이저 연구의 가장 기본이 될 것이다.

### 3. 광섬유 기반 초고속 펄스 레이저

초고속 광섬유 펄스 레이저는 나노카본 소재가 갖는 비선형 포화흡수 현상에 의존하게 되는데, 이러한 나노카본 소재는 나노크기와 더불어 빠른 회복시간과 넓은 파장대역을 큰 장점으로 갖게 된다. 그림 2에서 보논바와 같이 일반적인 광섬유 링 레이저의 구성요소는 기존 링 레이저의 구조와 동일하며, 단지 공진기 내에 나노카본 소재를 삽입한 것이 차이점이다. 이렇게 구성된 레이저 공진기 내에서는 광학적 비선형성과 색분산 (chromatic dispersion), 편광 등을 변수로 하여 펄스 형성 조건을 최적화 해 가게 된다. 일반적으로 약간의 분산이 존재하는 anomalous regime에서 비선형성과 균형을 이루어 펄스가 유지되게 되는데, 이들은 각각 광섬유 길이와 공진기 내 파워를 조절하면서 최적 조건이 도출 되어진다. 여기에 편광의 방향은 다른 하나의 큰 요소가 되는데, 반복되어 더해지는 편광의 성분이 가장 큰 값을 가질 때 이것이 포화흡수체의 최적 방향과 일치하게 되면, 펄스 형성은 가장 잘 이루어 질 것이다. 최근 몇 년 동안 나노카본 물질을 레이저 공진기에 어떠한 형태로 어떤 방법을 사용하여 삽입을 하는가가 큰 관건이었으며, 투명한 기판에 코팅된 나노카본 물질을 free space coupling을 이용하는 방법을 극복하고, 그림에서와 같이, 광섬유 페룰 (ferrule) 끝에 나노카본을 코팅하여 다른 페룰로 연결하는 방법이 추가 되어져 왔다.

제시된 일반적인 구조는 텔레콤 영역에서의 양질의 short pulse를 생성하는데 문제가 없었으나, 고 에너지 영역으로 진입하기에는 나노카본 소재의 열적 안정성 문제가 제기 되었다. 이를 극복하기 위해 제시된 방법이 evanescent field interaction (EFI) 방법인데, 그림 3에서와 같이, 기존의 방법이 레이저의 길목에 나노카본이

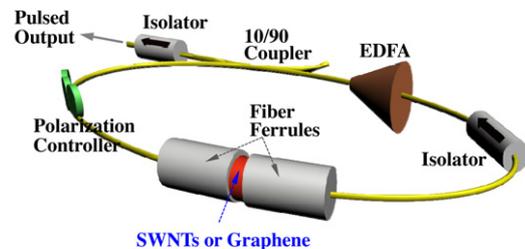


그림 2. 나노카본 소재를 포화 흡수체로 사용한 광섬유 펄스 레이저.

광섬유 기반 나노카본 비선형 소자

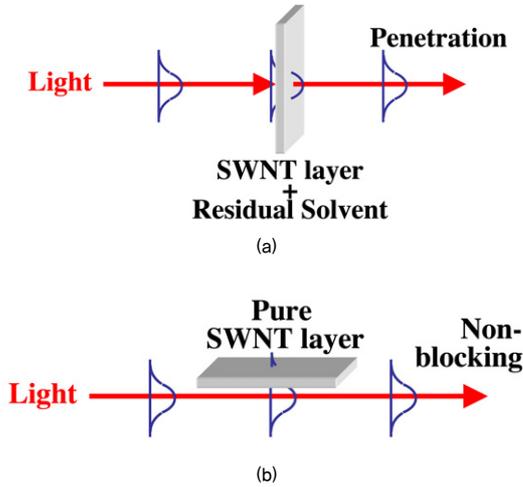


그림 3. 나노카본 saturable absorber의 (a) blocking scheme과 (b) non-blocking scheme의 비교.

위치하여 빛이 관통하는 ‘blocking scheme’ 이라고 하면 (그림 3(a)), EFI에서는 레이저 필드의 일부분인 소실장 (evanescent field)만이 나노카본과 상호작용하여 ‘non-blocking scheme’ 을 이루고 동일한 레이저 펄스를 형성 하게 된다 (그림 3(b)) [9]. 실제 측정으로 밝혀진 바에 의하면, 레이저와의 직접 작용에 의해서는 SWNT가 15 dBm까지 견뎌내었고, EFI로는 21 dBm 이상이 되어도 손상이 없음이 보고 되었다 [10].

이러한 EFI를 현실화 하기 위해, 광섬유 한쪽 옆의 클래드 부분을 제거하여 유효 굴절율을 낮추고, 진행하는 모드를 더욱 넓게 퍼지도록 유도한 D-shaped (또는 side-polished) 광섬유와, 광섬유를 가열하여 길게 늘어뜨려 neck을 만든 tapered fiber가 사용 되었다 [9,11]. D-shaped 광섬유의 평평한 면에 나노카본을 코팅하여 EFI를 실현하고 목적하는 펄스초 레이저를 제작 하였는

데, 그림 4에서는 이러한 개념으로 제작된 SWNT mode-locker와 이에 의해 생성된 펄스의 특성을 보여 주고 있다. 특히 수직 정렬된 SWNT들을 이용하여 편광 민감도를 이용하는 연구도 발표가 되었다 [12].

이러한 EFI 방법은 그래핀에도 동일하게 적용이 되었다. Bottom-up으로 제조되는 합성 그래핀과는 달리, 용액상에서 graphite를 반복하여 박리 (산화/환원 과정을 통해) 해서 얻은 reduced graphene oxide (RGO)를 D-shaped fiber에 코팅하여 동일한 펄스 형성 효과를 증명하였고, 또한 고 에너지에서도 역시 동작하는 것이 보고 되었다 [13].

이러한 EFI 방법은 2007년 처음 보고된 이래[9], 편광 변화에 따른 특성 연구, 나노카본과 레이저의 상호작용 극대화 연구 등의 효율성 연구가 지속되어 왔으며, 다양한 응용 연구에도 도입이 되어 펄스 형성 뿐 아니라 초고속 광학 스위칭에서도 효과가 보고 되고 있다 [4,5,14].

4. 신 공정 개발

일반적으로 나노카본을 이용해 mode-locker를 제작 하기 위해서는, 이 나노물질을 액체에 부유시켜 광소자의 한 부분에 코팅을 함으로써, 레이저와의 상호작용을 유도 한다. 그러나 기존의 제작 방식에서는 대부분의 나노카본의 소실 되는 관계로 이에 대한 개선이 필수적이다. 레이저 출력 펄스의 품질 향상/관리와 더불어, 이러한 공정에서의 효율 증가에 대한 연구도 큰 중요성을 띠게 되어, 최근 많은 연구가 진행 되고 있다.

적은 양으로 광섬유 끝면에 나노카본을 코팅할 수 있는 optical deposition방법은 SWNT와 그래핀 모두에 있어

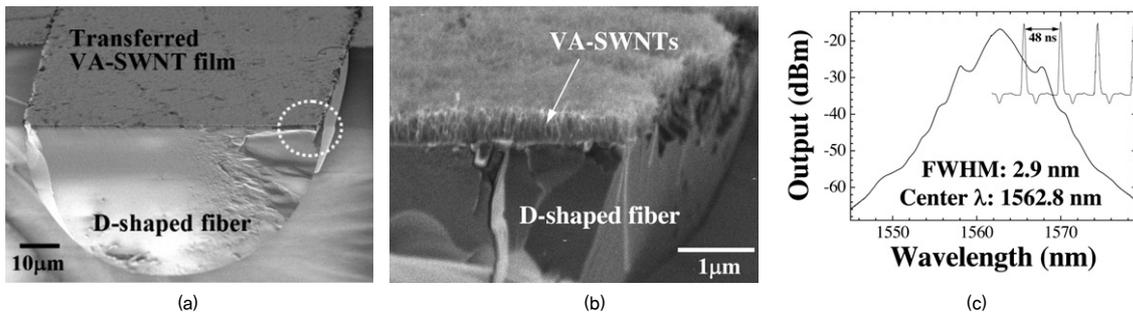


그림 4. (a) 수직 정렬된 SWNT (VA-SWNT)와 D-shaped 광섬유를 이용한 mode-locker와 (b) 이의 확대 이미지, 그리고 (c) 이를 이용해 생성된 출력 펄스의 스펙트럼과 펄스 열.

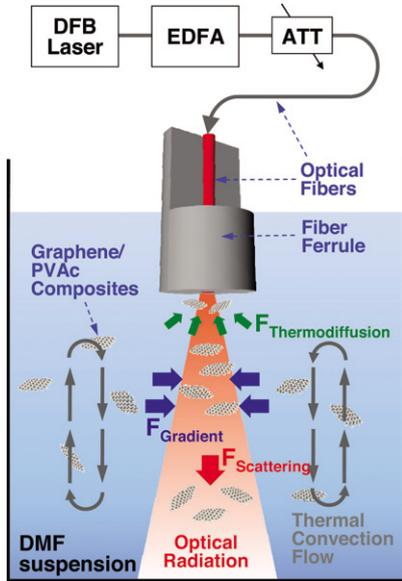
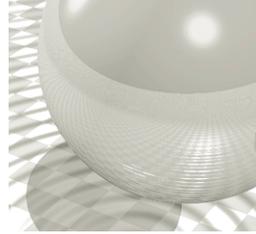
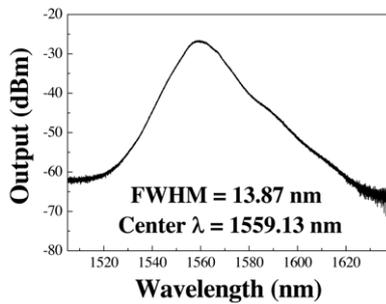
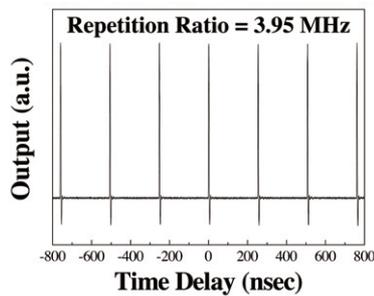


그림 5. Optical deposition에 의한 그래핀의 증착.



(a)



(b)

그림 6. Electro spray에 의해 제작된 펄스 레이저의 (a) 출력 스펙트럼 및 (b) 펄스 열.

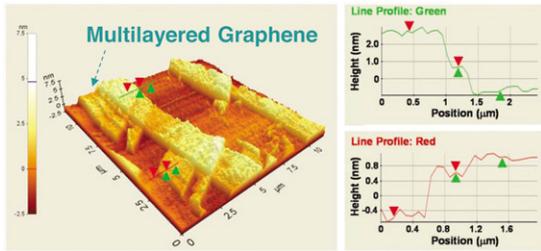
서 적용 되었다. 레이저를 나노구조가 부유되어 있는 suspension에 조사하게 되면, 대류, 광조사, 열확산(thermodiffusion)등의 현상에 의해 광섬유 코어부분에 나노카본이 증착되게 된다(그림 5). 이렇게 증착된 나노

구조는 morphology에 일부 손상은 있지만, 비선형성이 유지가 되어 펄스 형성이 가능 하며, 특히 그래핀의 손상을 최소화 하기 위해 폴리머 물질과 혼용하여 나노버퍼층을 도입하는 연구 결과도 보고 되었다 [15].

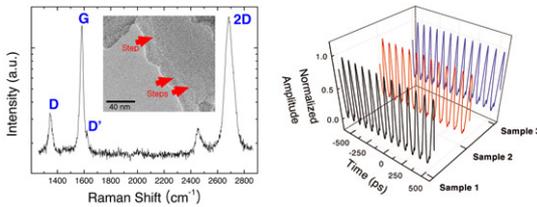
또한, 일반적인 스프레이와는 차별된 스프레이 방법으로, electro spray와 aerosol deposition (AD) 방법을 도입하여, 더 효과적인 공정으로 개선 하였다 [16,17]. Electro spray에서는 기판과 스프레이 팁 사이에 높은 전기장을 인가하여, suspension이 분사되면서 전하에 의해 서로 나노 droplet으로 분리가 되면서 분산성이 매우 좋게 코팅 되는 방법으로, 나노 morphology에 의존하는 나노카본의 비선형성을 극대화 하였는데, 이렇게 제작된 레이저의 출력 특성을 그림 6에 나타내었다. 또한 목표물에 집중 된 분사로 인해 기존 스프레이에 비해 95% 이상의 효율 향상이 이루어 졌다. AD 방법은 나노카본 입자를 실리카 입자와 고상으로 혼합하여 고속의 운동에너지를 가하고, 기판에 충돌시켜 막을 직접 형성하는 방법이다. 나노카본이 특정 용매에 대해 갖고 있는 용해도를 극복 할 수 있다는 점에서 큰 의미가 있는 방법이며, 이 역시 비선형성이 유지 됨을 펄스 레이저 구성을 통해 증명 하였다.

그래핀 기반의 mode-locker 제작에 있어서, 다른 하나의 손쉬운 방법으로 기계적인 박리 (mechanical exfoliation)에 의한 그래핀 제조 또한 성공적으로 이루어 졌다 [18]. 단순한 스카치 테이프를 이용하여 방향이 정돈된 그래파이트를 반복적으로 박리한 후, 잘 세척된 광섬유의 끝 부분을 접촉하여 그래핀 층이 실리카 표면에 붙게 만드는 방법으로, 그래핀 층간의 결합력 보다는 그래핀-실리카 결합이 큰 성질을 이용한 방법이다. 탁월한 그래핀의 품질로 인해 비선형성이 잘 유지 되어 있어 초고속 광학 소자를 성공적으로 제작한 결과가 보고 되었다. 한층의 투과도 손실이 2.3%로 알려져 있는 그래핀의 존재는 광학현미경으로도 관찰 되는데, 일반적으로는 고유의 포논 에너지를 방출하면서 발생하는 Stokes 라만 산란의 검출과 나노 morphology 분석에 의해 그래핀 특성을 조사하게 된다. 그림 7은 기계적 박리에 의해 제조된 다층 그래핀의 atomic force microscopy (AFM) 측정 결과와 라만 특성, 그리고 이를 이용하여 제작된 복수의 샘플이 생성하는 동일한 펄스 출력을 나타내었다.

광섬유 기반 나노카본 비선형 소자



(a)



(b)

(c)

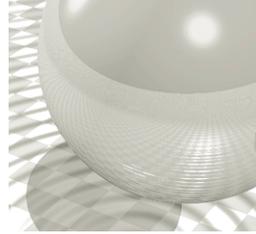
그림 7. (a) 기계적 박리에 의해 만들어진 다층 그래핀의 AFM 사진과 (b) 라만 특성, 그리고 (c) 이를 이용해 생성된 펄스의 펄스 열.

5. 맺음말

나노카본의 광학적 비선형성으로 인해 보다 집적되고 효과적인 비선형 광학 소자들의 현실화가 가능하게 되었다. 나노 크기에서도 기존의 반도체나 결정 기반 소자들과 비교하여 많은 장점을 갖고 있는 나노카본에 대한 연구는 현재도 밀도 있게 진행 되고 있으며, 적용 분야도 단지 초고속 펄스 레이저 뿐 아니라 광전소자, 스위칭 소자 등으로 확장 되어지고 있다. 기본적인 원리 규명 뿐 아니라, 극도로 낮은 흔들림, 파장 가변성, 더 좁은 펄스 폭, 더 큰 에너지 등의 pulse quality에 대한 연구가 이루어지면서, 보다 실리적인 경제성과 효율성에 대한 연구도 병행 되어져야 할 것이다. 가까운 미래에 요구 되어지는 막대한 데이터의 트래픽을 감당하기 위해서는 NT와 IT의 접목은 필수적이며, 여기에 나노카본포토닉스가 하나의 견인차 역할을 하리라 기대 된다.

참고문헌

- [1] S. Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka, M. Jablonski, Y. Sakakibara, A. Rozhin, M. Tokumoto, H. Kataura, Y. Achiba, and K. Kikuchi, "Mode-locked fiber lasers based on a saturable absorber incorporating carbon nanotubes," in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC), PD44 (2003).
- [2] S. Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka, and M. Jablonski, "Laser mode-locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes," IEEE J.Lightwave Technol., 22, 51-56 (2004).
- [3] S. Yamashita, Y. Inoue, S. Maruyama, Y. Murakami, H. Yaguchi, M. Jablonski, and S. Y. Set, "Saturable absorbers incorporating carbon nanotubes directly synthesized onto substrates/fibers and their applications to mode-locked fiber lasers," Opt.Lett., 29, 1581-1583 (2004).
- [4] Y. W. Song, S. Y. Set, S. Yamashita, "Novel Kerr shutter using carbon nanotubes deposited onto a 5-cm D-shaped fiber," in Proceedings of Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO), CMA4 (2006).
- [5] K. K. Chow, S. Yamashita, and Y. W. Song, "A widely tunable wavelength conversion based on nonlinear polarization rotation in a carbon nanotubes deposited D-shaped fiber," Opt. Exp., 17(9),7664-7669 (2009).
- [6] Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang, Z. Ni, Y. Yan, Z. X. Shen, K. P. Loh, and D. Y. Tang, "Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers," Adv.Funct.Mater., 19, 3077-3083(2009).
- [7] Z. Sun, T. Hasan, F. Torrisi, D. Popa, G. Privitera, F. Wang, F. Bonaccorso, D. M. Basko, and A. C. Ferrari, "Graphene mode-locked ultrafast laser," ACS Nano, 4, 803-810 (2010).
- [8] S. Yamashita, "A tutorial on nonlinear photonic applications of carbon nanotube and graphene," J. Lightwave Technol., 30(4), 427-447 (2012)
- [9] Y. W. Song, S. Yamashita, C. S. Goh, and S. Y. Set, "Carbon nanotube mode-lockers with enhanced nonlinearity via evanescent field interaction in D-shaped fibers," Opt.Lett., 32, 148-150 (2007).
- [10] Y. W. Song, S. Yamashita, and S. Maruyama, "Single-walled carbon nanotubes for high-energy



optical pulse formation," Appl. Phys.Lett., 92, 021115 (2008).

- [11] Y. W. Song, K. Morimune, S. Y. Set, and S. Yamashita, "Polarization insensitive all-fiber mode-lockers functioned by carbon nanotubes deposited onto tapered fibers," Appl. Phys.Lett., 90, 021101 (2007).
- [12] Y. W. Song, S. Yamashita, E. Einarsson, and S. Maruyama, "All-fiber pulsed lasers passively mode-locked by transferable vertically aligned carbon nanotube film," Opt.Lett., 32, 1399-1401 (2007).[13] Y. W. Song, S. Y. Chang, W. S. Han, and M. K. Bae, "A graphene mode-locker for fiber lasers passively pulsed by evanescent field interaction," Appl. Phys.Lett., 96, 051122 (2010).
- [14] Y. W. Song, S. Yamashita, E. Einarsson, and S. Maruyama, "All-fiber pulsed lasers passively mode-locked by transferable vertically aligned carbon nanotube film," Opt.Lett., 32, 1399-1401 (2007).
- [15] H. S. Kim, J. H. Cho, S. Y. Chang, and Y. W. Song, "Deformation-immunized optical deposition of graphene for ultrafast pulsed lasers," Appl. Phys.Lett., 98, 021104 (2011).
- [16] S. H. Chu, W. S. Han, I. D. Kim, Y. G. Han, K. I. Lee, S. B. Lee, and Y. W. Song, "Ultrafast saturable absorption devices incorporating efficiently electrospayed carbon nanotubes," Appl. Phys.Lett., 96, 051111 (2010).
- [17] H. J. Kim, H. J. Choi, S. M. Nam, and Y. W. Song, "High-performance laser mode-locker with glass-hosted SWNTs realized by room-temperature aerosol deposition," Opt. Exp., 19, 4762-4767 (2011).
- [18] Y. M. Chang, H. S. Kim, J. H. Lee, and Y. W. Song, "Multilayered graphene efficiently formed by mechanical exfoliation for ultrafast photonics," Appl. Phys.Lett., 97, 211102 (2010).

## 약 력

### 김원준



- 2012~현재 고려대학교, 신소재공학과, 대학원
- 2011~현재 한국과학기술연구원, 학생연구원
- 2011 명지대학교, 신소재공학과, 학사

### 송용원



- 2007~현재 한국과학기술연구원, 책임연구원
- 2004 동경대, JSPS Fellow ~2007
- 2004 Univ. of Southern California (USC), Materials Science, 박사
- 2002 Univ. of Southern California (USC), Electrical Engineering, 석사
- 1995~1998 LG전선 광통신연구소, 연구원
- 1996 한양대학교, 무기재료공학과, 석사
- 1994 한양대학교, 무기재료공학과, 학사