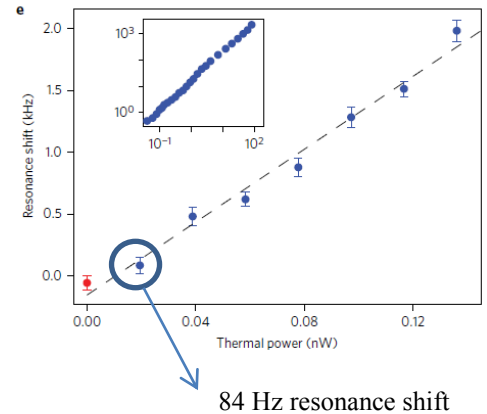


Q&A

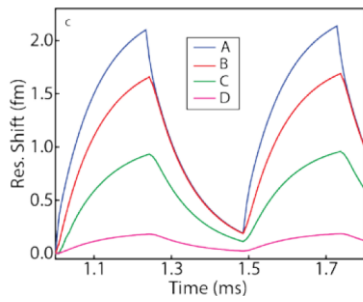
이 논문은 optical microresonator 에서 발생하는 WGM 의 resonance frequency 가 미세한 온도 변화에 따라 달라지는 것을 이용해(index of refraction n 이 달라지므로) 이것을 ultrasensitive 한 온도계로 활용하여 nanometer size 의 single particle 을 label 없이 상온에서 imaging 하는 방식에 대해 설명하고 있습니다. nanorod 와 빛(pump beam)의 resonance 로 인해 photon 의 에너지는 열로 전환되고 주변 system 으로 dissipate 되어 미세한 온도 변화를 만들어냅니다. 따라서 pump beam 을 조사한 위치에 따라 온도 변화를 정확하게 측정해낼 수 있다면 온도 변화를 2 차원 평면에 plot 하여 nanoparticle 을 imaging 할 수 있습니다. 그런데 온도 변화로 환산될 수 있는 resonance shift 의 정밀도(측정한계)로 제시된 것이 84 Hz(온도로는 100 nK 에 해당)로 매우 파격적인 값이었습니다. 그들은 이것이 double modulation scheme 을 통해 가능하다고 주장하고 있습니다.



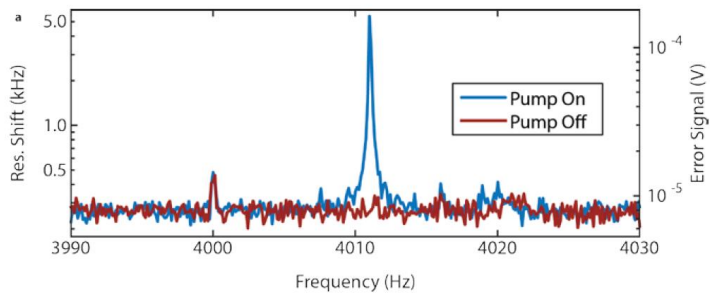
Here are Questions presented during presentation and corresponding answers. The overall talk was quite confusing. However questions can be categorized as following.

Q1. What is the reference of the resonance shift? (Resonance shift 의 reference 가 무엇인가?)

A1. 200 MHz 의 Phase modulation 을 통해 probe beam 을 carrier 와 sideband 로 분리한 후 photodetector 로 microresonator 를 통과한 probe beam 을 측정합니다. Probe beam 의 frequency 를 tuning 하면서 WGM resonance frequency 를 지나가도록 하여 error signal 을 측정하면 resonance frequency 근처에서 detuning 에 선형적으로 비례하는 구간이 존재하고 이 구간에서 feedback loop 를 돌립니다. 이것이 PDH locking scheme 이고 double modulation scheme 은 여기서 pump beam 의 power 에 4 kHz 의 modulation 을 주는데 이로 인해 WGM resonance shift 는 4 kHz 로 진동하게 됩니다. 결과적으로 frequency domain 에서 error signal 은 4 kHz 로 진동하는 성분을 가지게 됩니다. 즉, pump modulation frequency 에서의 error signal 의 크기를 측정하면 resonance shift 를 얻을 수 있습니다. 여기서 30 μ V/kHz 의 error signal slope 의 값이 calibration 에서 핵심이 되는데, 이는 probe beam linewidth 로 인한 frequency distribution 의 1σ 값이 manufacturer 값과 같음을 구함으로써 double check 되었습니다.



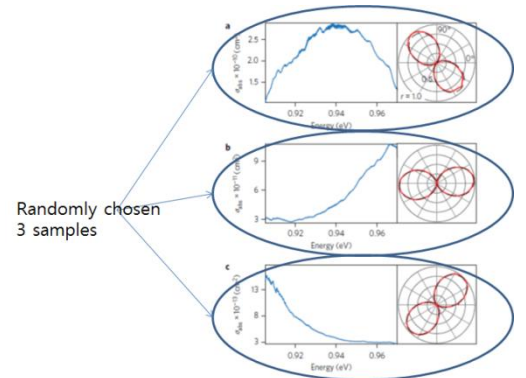
↑ 2~4 kHz 의 pump beam amplitude modulation



↑ error signal 에서의 4 kHz 성분(0.122 Hz bandwidth 의 network analyzer 로 측정)

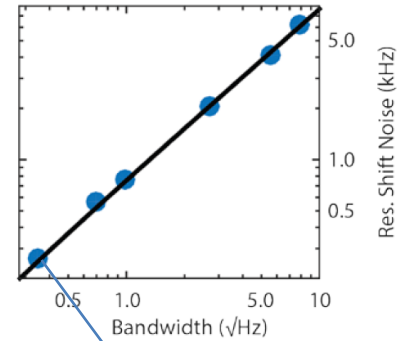
Q2. Pump and probe decoupling, what it means? And what is the graph saying? (Pump 와 probe 가 decouple 되어있다는 것의 의미와 그래프가 말하고 있는 것.)

A2. Absorption cross section 은 probe beam 을 통해 측정된 resonance shift 을 이용해 dissipated heat 을 finite-element simulation 으로 계산하여 구할 수 있습니다. Pump beam 과 probe beam 이 서로 연결되어 있지 않고 독립적이기 때문에 probe beam coupling 에 영향을 주지 않고 pump beam 의 energy 나 polarization 등을 조작하면서 absorption cross section 의 변화를 보는 것이 가능합니다. 논문의 Fig 2.는 pump beam 의 frequency 를 0.905~0.969 eV(1280~1370 nm)에서 바꿈에 따라 absorption cross section 을 본 것입니다. 그림 a,b,c 는 resonator 위에 흩뿌려진 채로 (dry 시켜서)고정된 61 개의 무작위 nanorod 중 선출된 3 개의 샘플입니다. 각각의 absorption 스펙트럼과 normalized absorption 의 polarization angle(pump beam 의)에 대한 의존성이 같이 그려져 있습니다. Polarization dependence 그래프는 pump energy 를 0.94 eV 로 고정시킨 상태로 측정되었습니다. 일반적으로 dipolar absorber 에 선형편광된 빛이 들어갈 경우 빛의 편광방향이 absorber 에 나란할 때 absorption 이 가장 크게 일어날 것입니다. 따라서 오른쪽에 나란히 그려진 그래프는 gold nanorod 의 방향에 대한 정보를 나타낸다고 할 수 있습니다. 한편 왼쪽에 그려진 스펙트럼은 gold nanorod 의 resonance energy 에 대한 정보를 나타내고 있는데, 이것이 제각각 다르게 나타난다는 것은 goldnanorod 의 polydispersity(size 가 제각각인 특성)를 의미한다고 할 수 있습니다. pump laser 를 독립적으로 조작함에 따라 정보를 얻을 수 있다는 것을 demonstration 을 한 것으로 보입니다.



Q3. How to get sensitivity of 84 Hz? Is it actually stable? What about SNR or measuring time?(이전 연구와 차별화된, 84 Hz 의 sensitivity 가 가능했던 이유와 안정성 논의)

A3. Small resonance shift 를 측정하기 위한 이전 연구의 노력으로는 보통 signal 을 증폭시키던지 noise 를 suppress 시키는 것이 있었습니다. 이번 연구의 다른 점은 measurement bandwidth 를 감소시킴으로써 SNR 을 증가시킨 데에 있습니다. Double modulation scheme 의 이점은 우리가 원하는 frequency 에서(amp modulation) 매우 낮은 bandwidth 로(error signal 을 측정하는 lock-in amplifier 의 bandwidth 는 0.1375 kHz) 측정하기 때문에 bandwidth 밖의 noise 를 제거하는 것이 가능하여 resonance shift noise 를 줄일 수 있다는 것입니다. 이로 인한 noise floor 는 280 Hz 정도 되는데 30 sample 에 대한 average 를 통해 noise 를 줄이는 것 이외의 noise suppression 방식을 쓰지 않았기 때문에 높은 noise floor 를 가지고 있습니다. 결국 **84 Hz resonance shift** 측정은 **detection noise floor** 안에서 측정된 것으로 볼 수 있습니다. 비록 현재 측정한 것은 detection noise floor 보다 작은 영역의 측정이긴 하지만 double modulation 과 extremely narrow measurement bandwidth($\tau_c = 1$ s), 그리고 WGM mode 의 high Q factor($Q = 2 \times 10^7$)를 통해 error signal 의 기울기를 키워서 원리적으로 84 Hz 에 해당하는 resonance shift 를 측정했다고 볼 수 있고, 차후 noise suppression 과 Q factor 를 증가시킴으로써 더욱 optimize 된 optical microresonator 를 찾으면 더 낮은 detection noise floor 로 더 정밀한 측정이 가능하다는 것이 인정받을만한 점인 것으로 보입니다.



0.282 kHz