

学术交流报告



光谱结构分析与频率相干性

祝宁华
中国科学院
半导体研究所

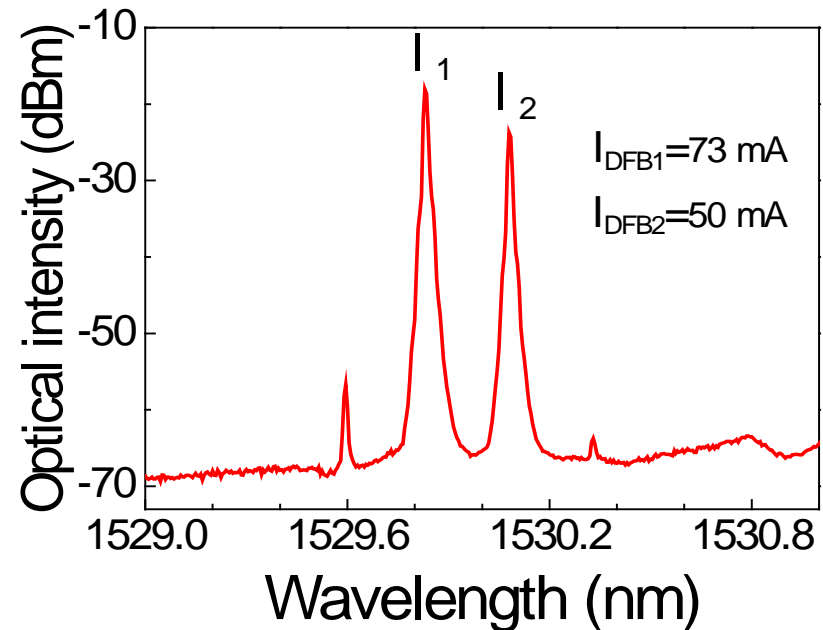
April 09, 2015

我的几个疑问



光谱是什么？

激光器波长、
线宽、功率.....



怎样分析光谱？

光谱仪： 0.01nm (GHz) @ 1.55 $\text{\textcircled{4}}$ m

1kHz? 1Hz? 1mHz?

我的几个疑问



为什么两束光拍频产生的微波信号的频谱线宽小于光谱线宽？

为什么相干长度可达到100km以上？

相干长度和光谱线宽是什么关系？

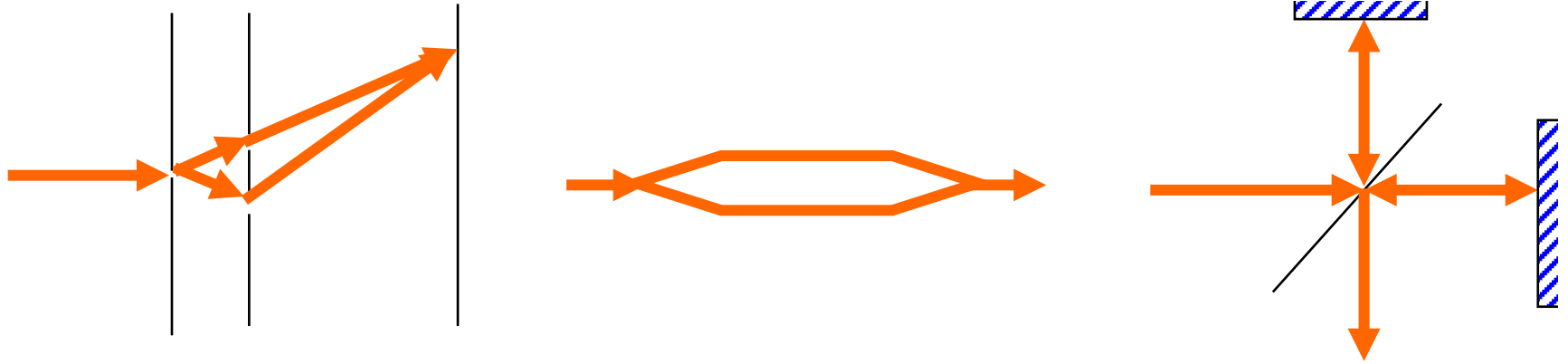
学术交流报告



光谱结构与频率相干性

- 光谱结构的理解
- 光束频率相干性

传统的光谱分析方法



传统的光谱分析方法，如Michelson干涉仪的局限：光束发散，镜子抖动，相同频率拍频，分辨本领（ $\text{③}/\text{①}\text{③}$ ）为 10^5 量级

借助频谱分析，分辨本领 10^{17} 量级

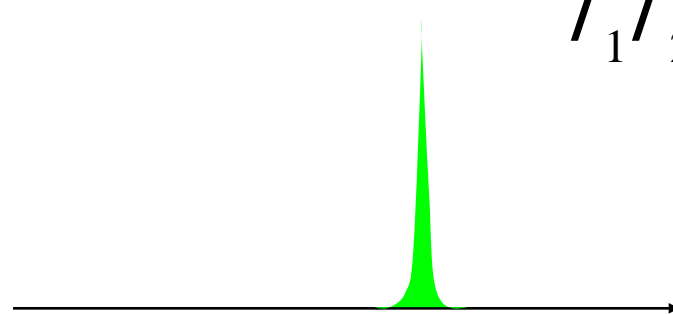
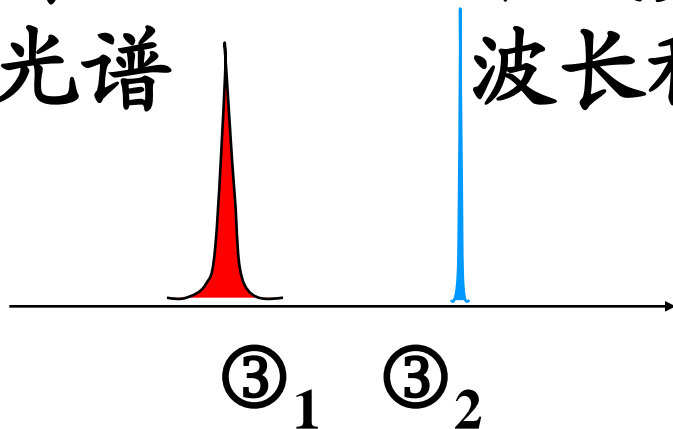
光谱特性的频谱分析法



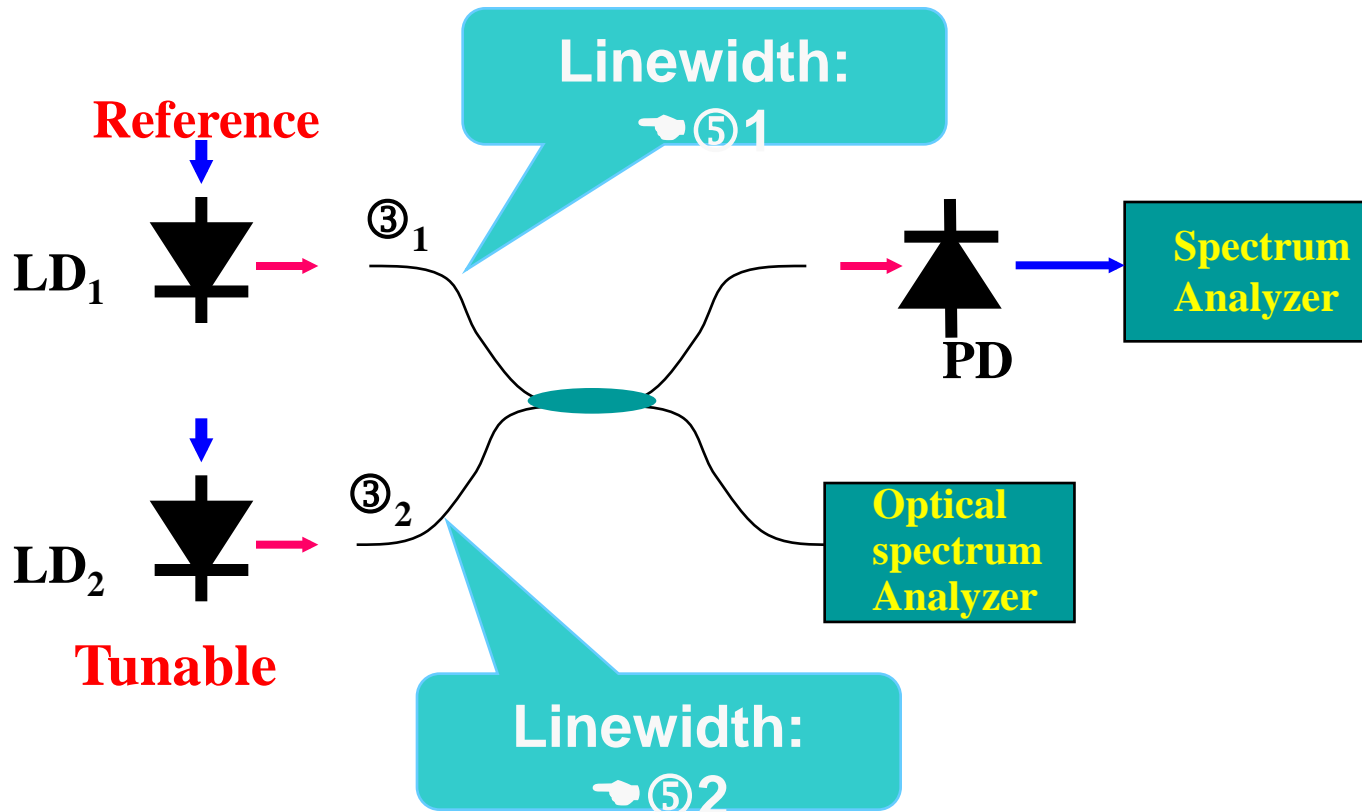
待测
光谱

窄线宽，
波长稳定

$$f_m = \frac{l_2 - l_1}{l_1 l_2} c$$



光谱特性的频谱分析法

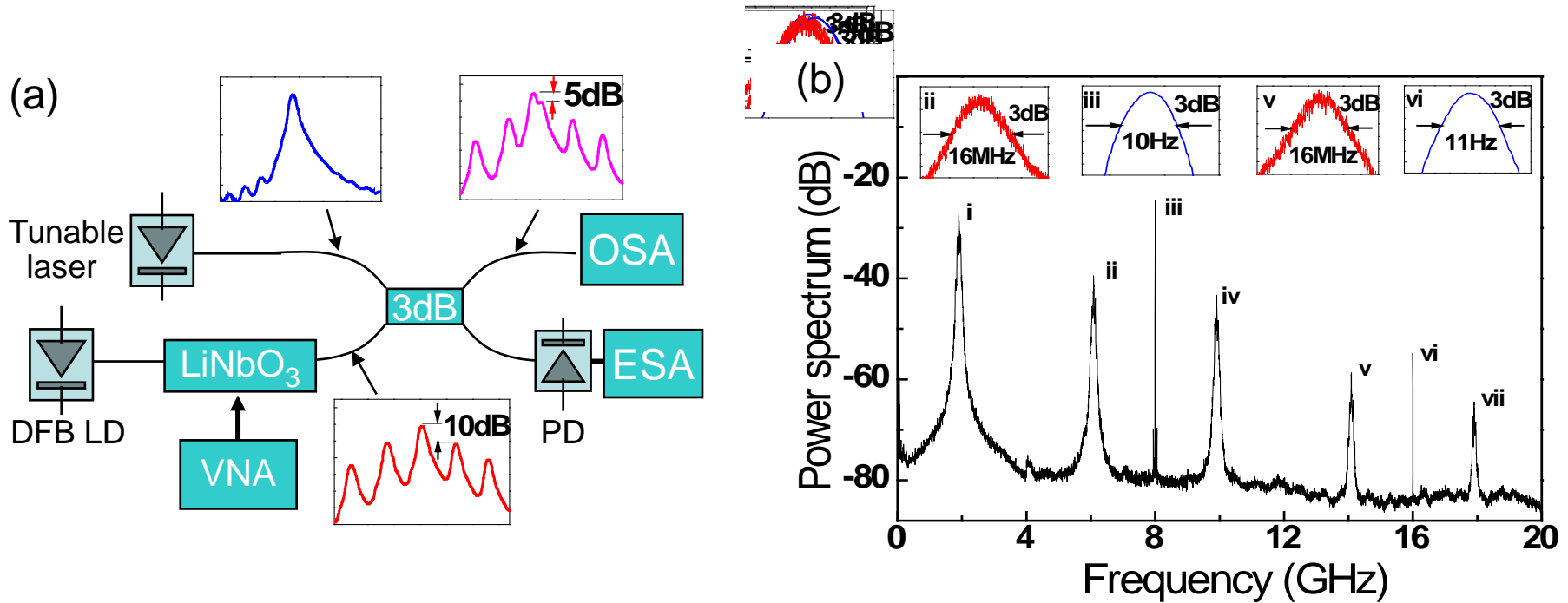


Microwave linewidth: ⑩ ➔ ⑤1 + ➔ ⑤2

光谱特性的频谱分析法



观察到的奇特现象



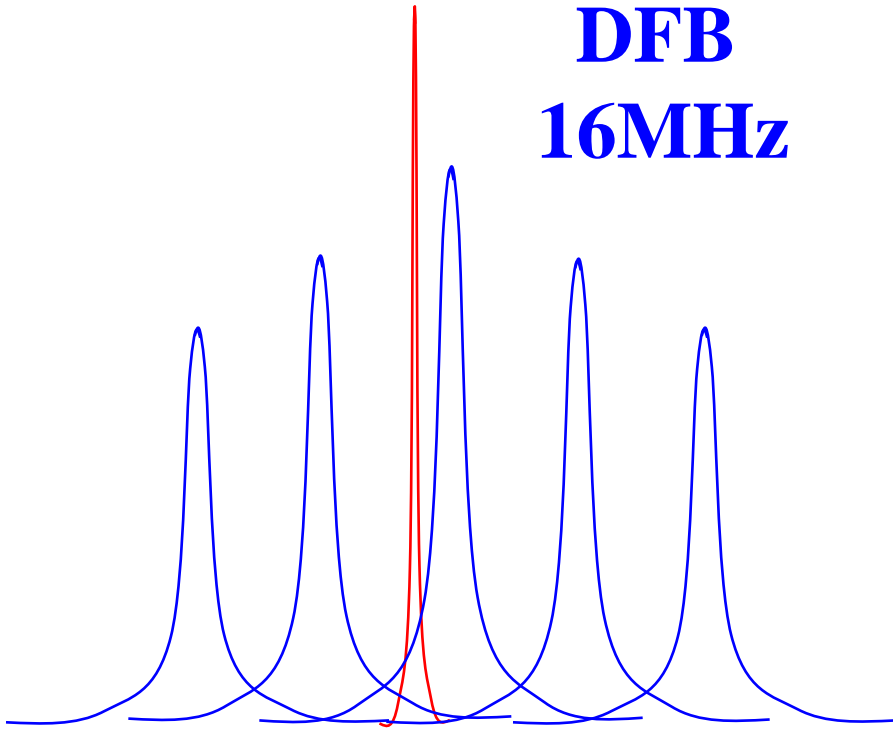
导致光谱结构的研究！

光谱特性的频谱分析法

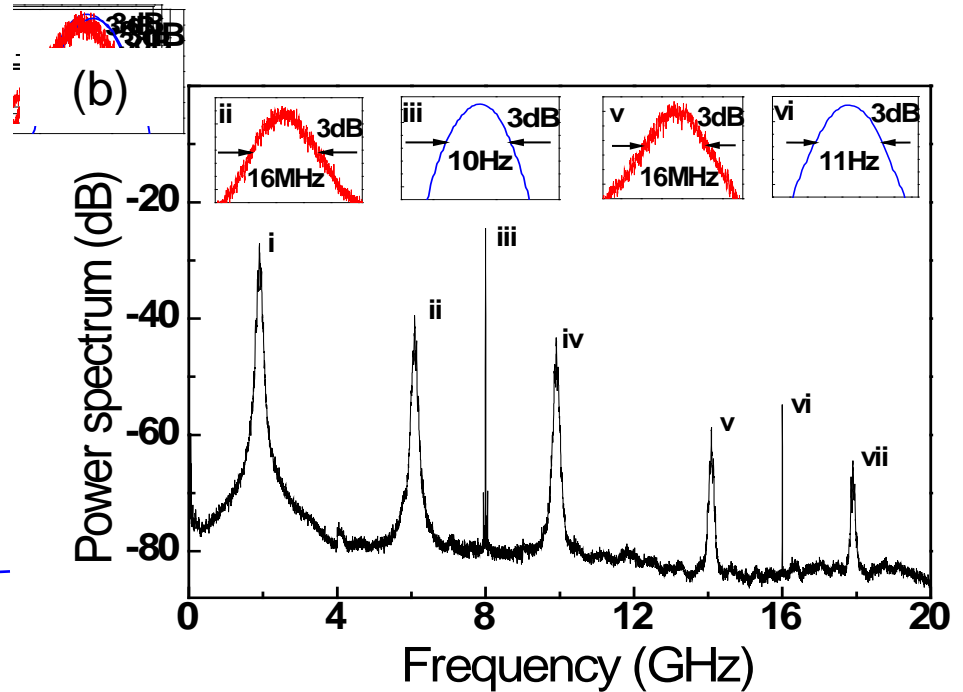


100kHz

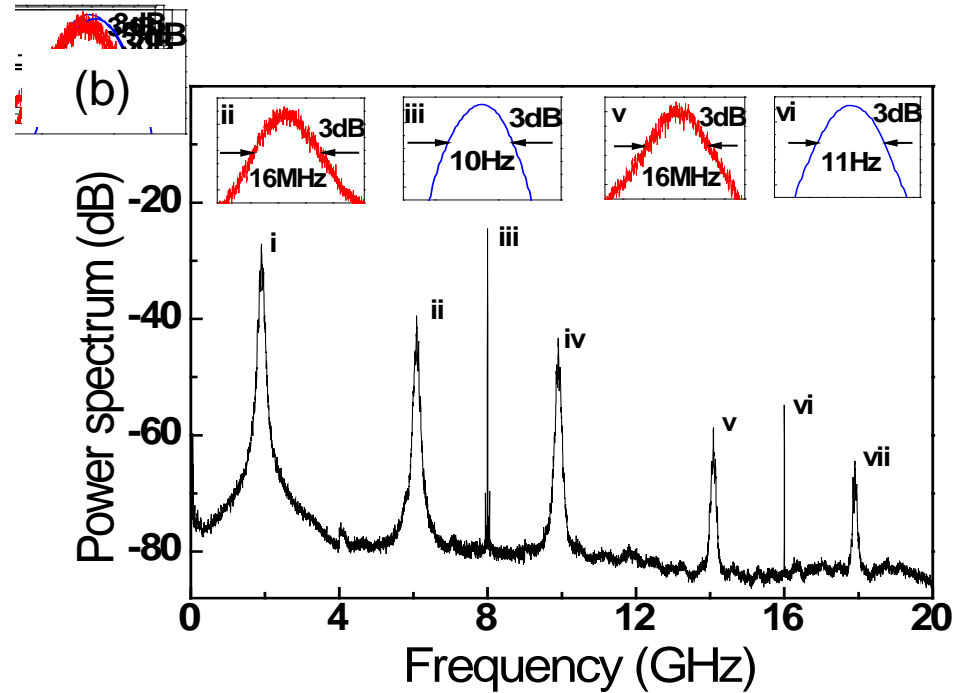
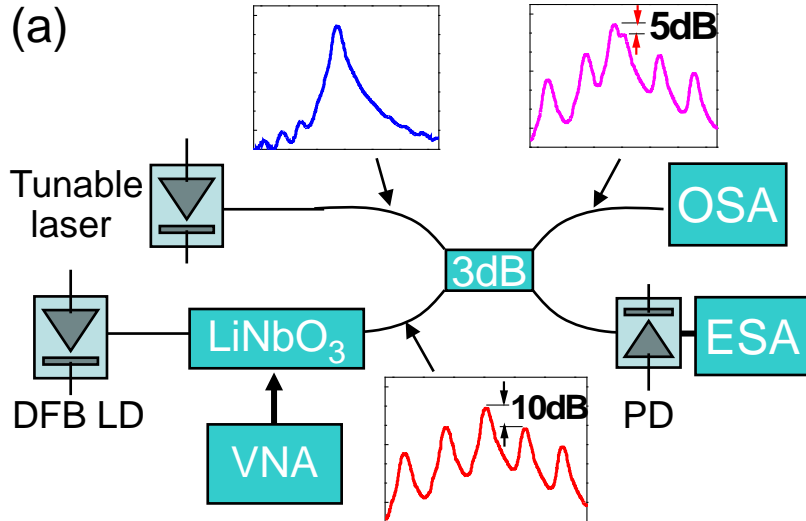
典型
DFB
16MHz



窄 + 宽 = 宽
宽 + 宽 = 窄



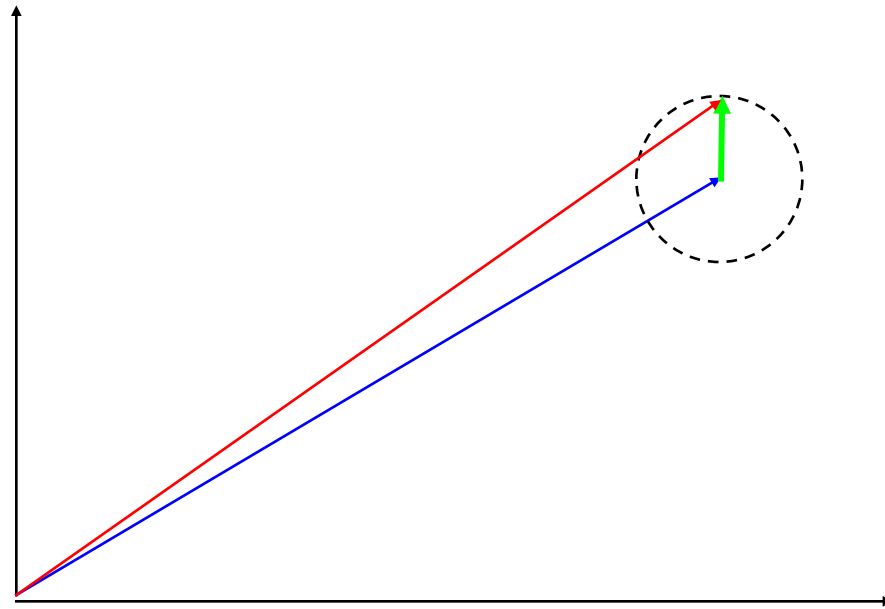
光谱特性的频谱分析法



光谱是由什么构成的？

光谱结构与激光器特性的关系？

Henry的光谱结构模型



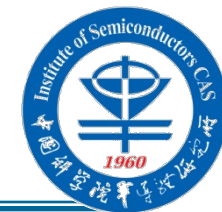
自发
辐射
~1ns

解释光谱展宽(~50倍)的原因!

自发辐射拍频信号, ∞ - peak.....

C.H.Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers,"
vol.18, pp.259-264, 1982 .

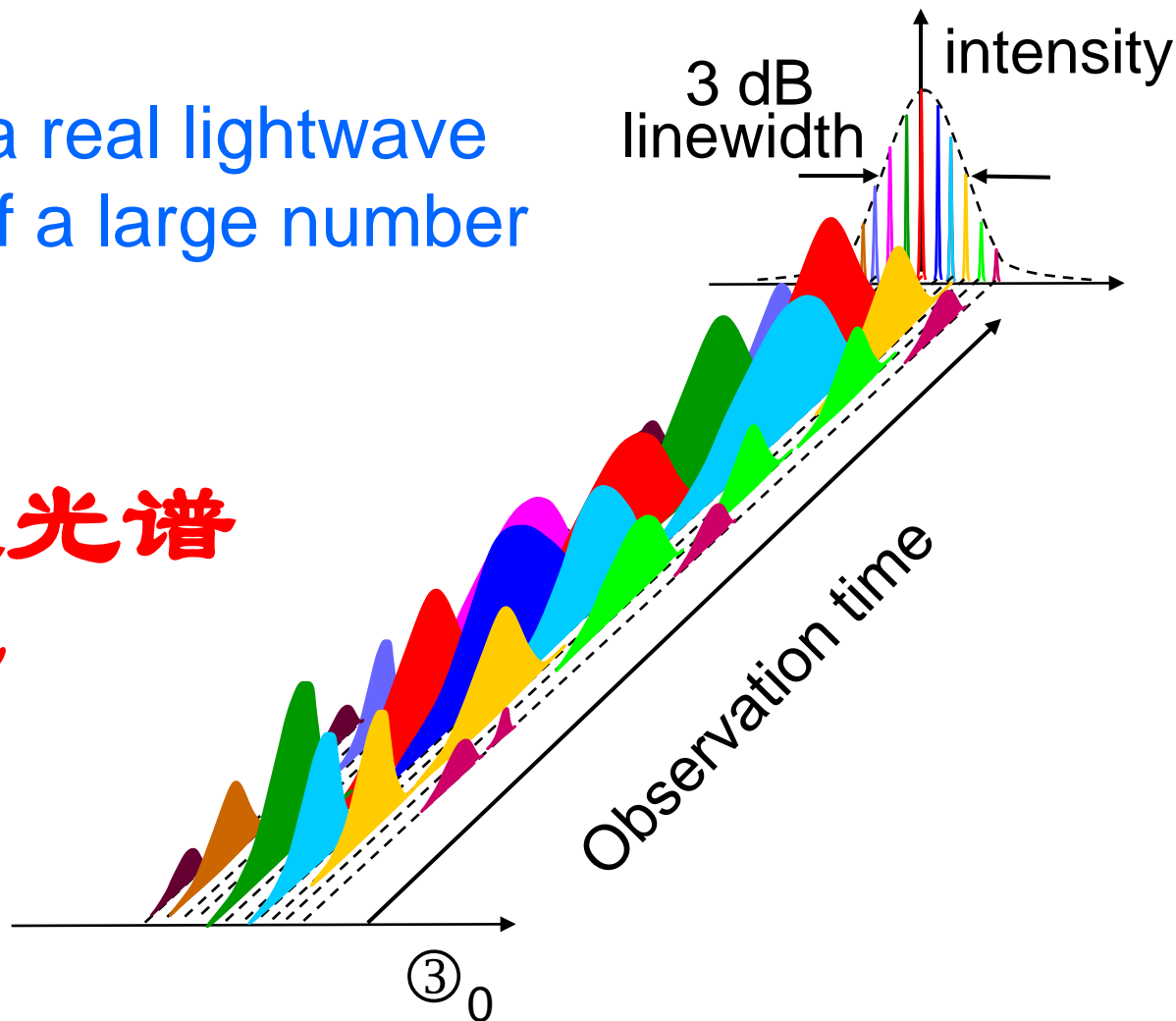
光谱的结构模型



Born经典理论 《光学原理》

The spectrum of a real lightwave source consists of a large number of wave trains

波列是构成光谱的基本单元



波列的四个参数

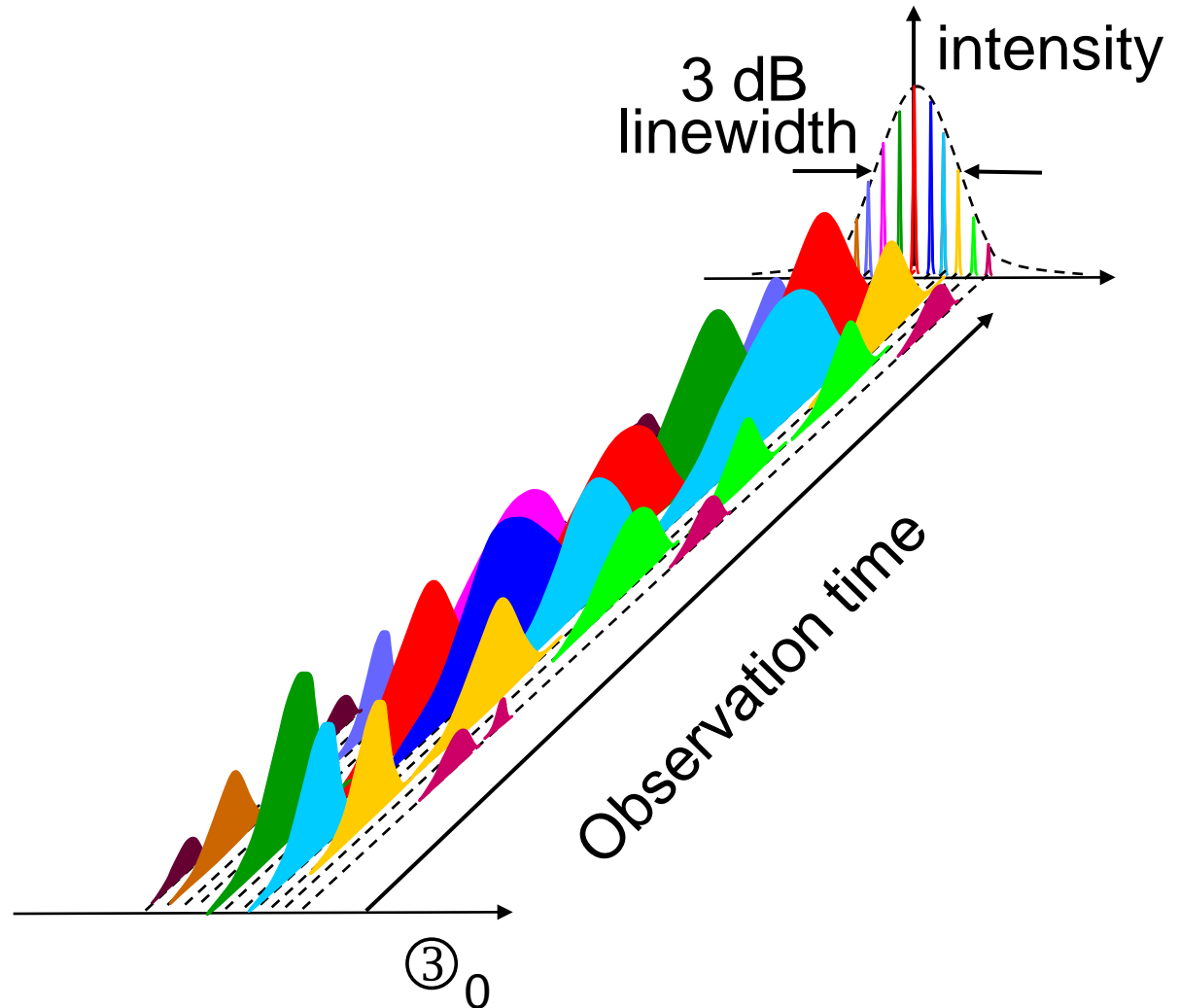


波列线宽

波列间隔

时间分布

波列长度

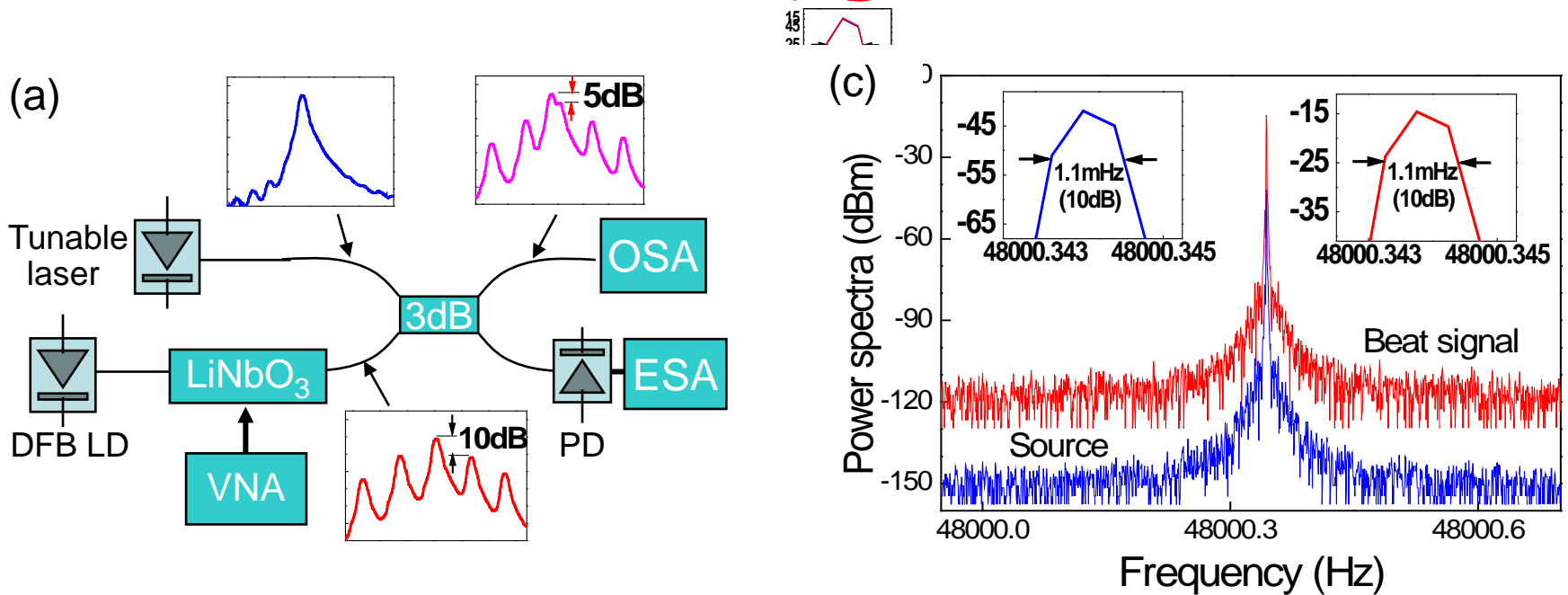


光谱结构：波列线宽测量



⑤ < 1 mHz ③ < 10^{-23} m @ 1.55 μm

比DFB激光器的线宽低10个数量级！

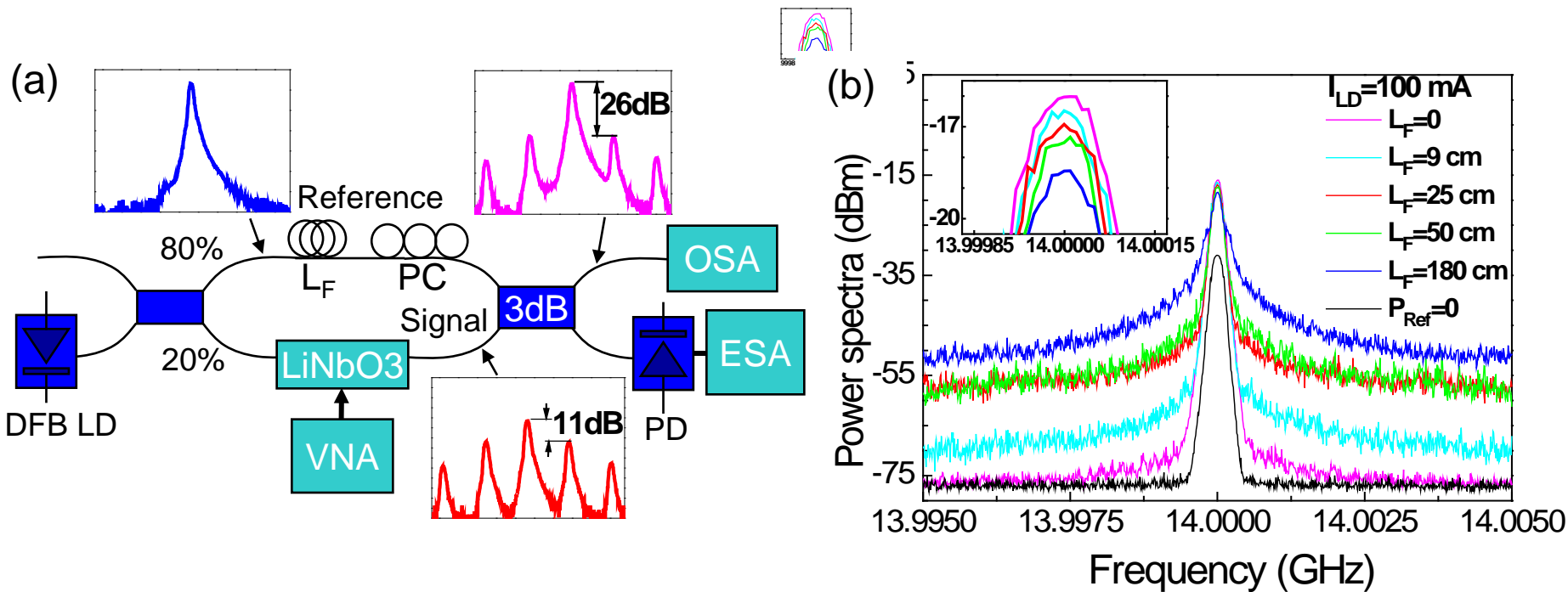


克服Michelson干涉仪光束发散，镜子抖动，相同频率拍频的问题，将分辨本领从 10^5 提高到 10^{17}

光谱结构：波列间隔

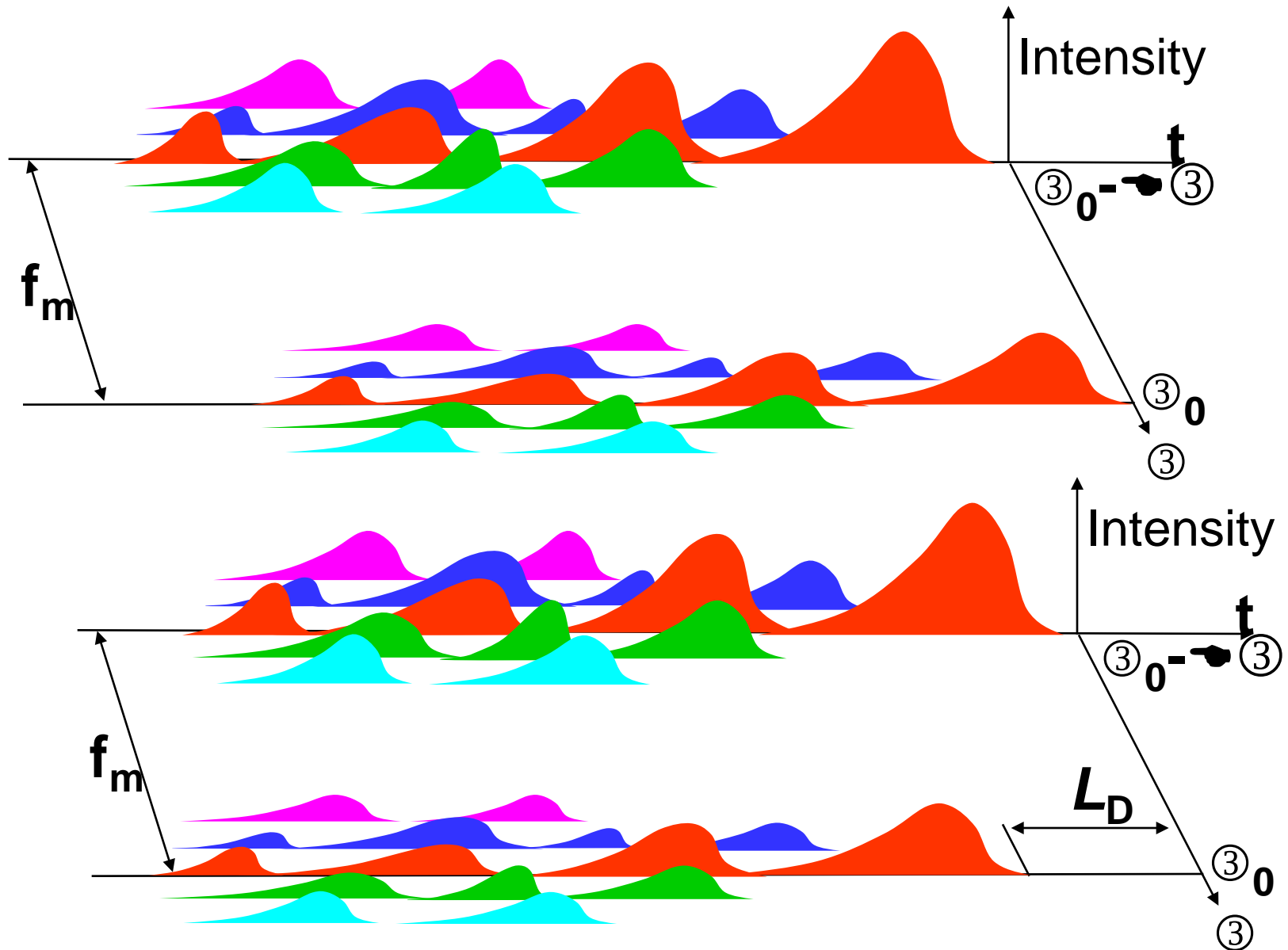


幅度下降，噪声增加



说明什么？

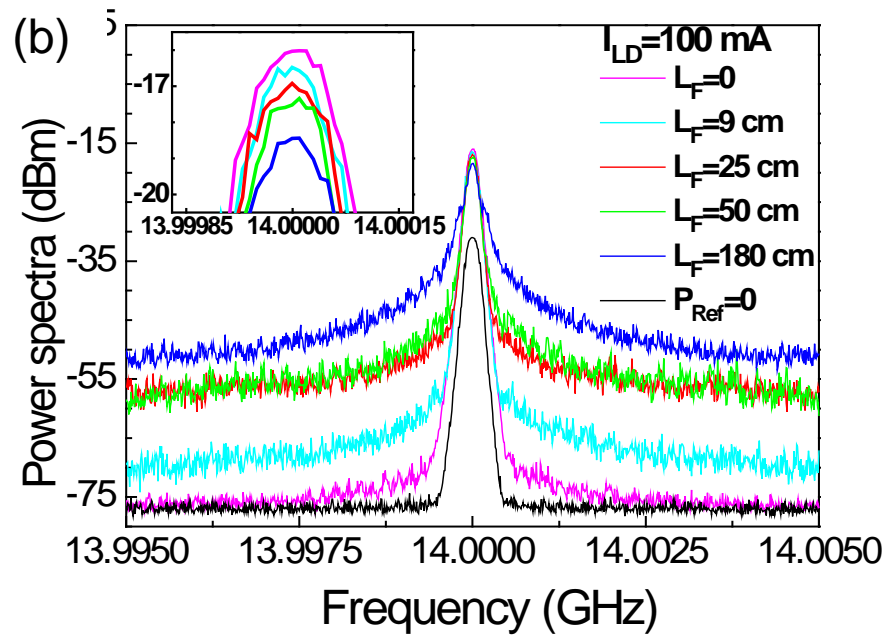
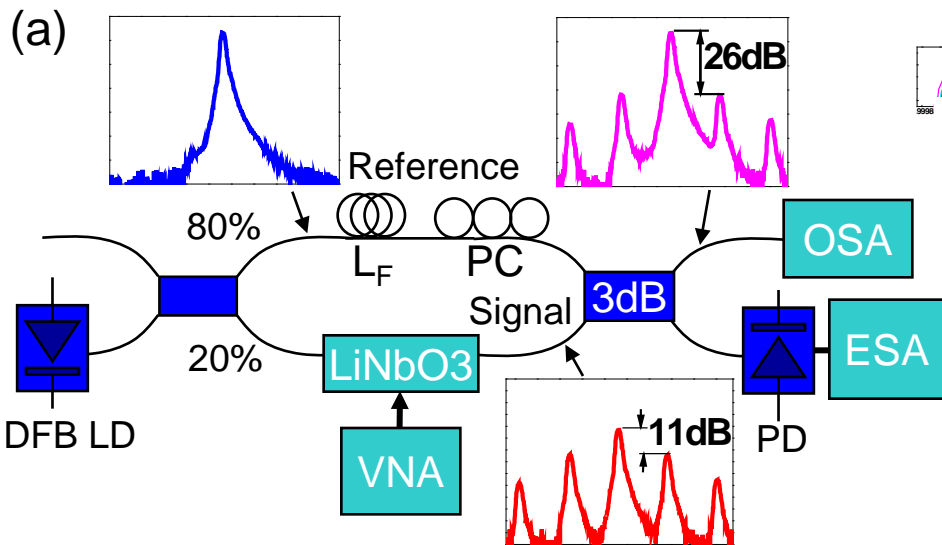
光谱结构：波列间隔



光谱结构：波列间隔

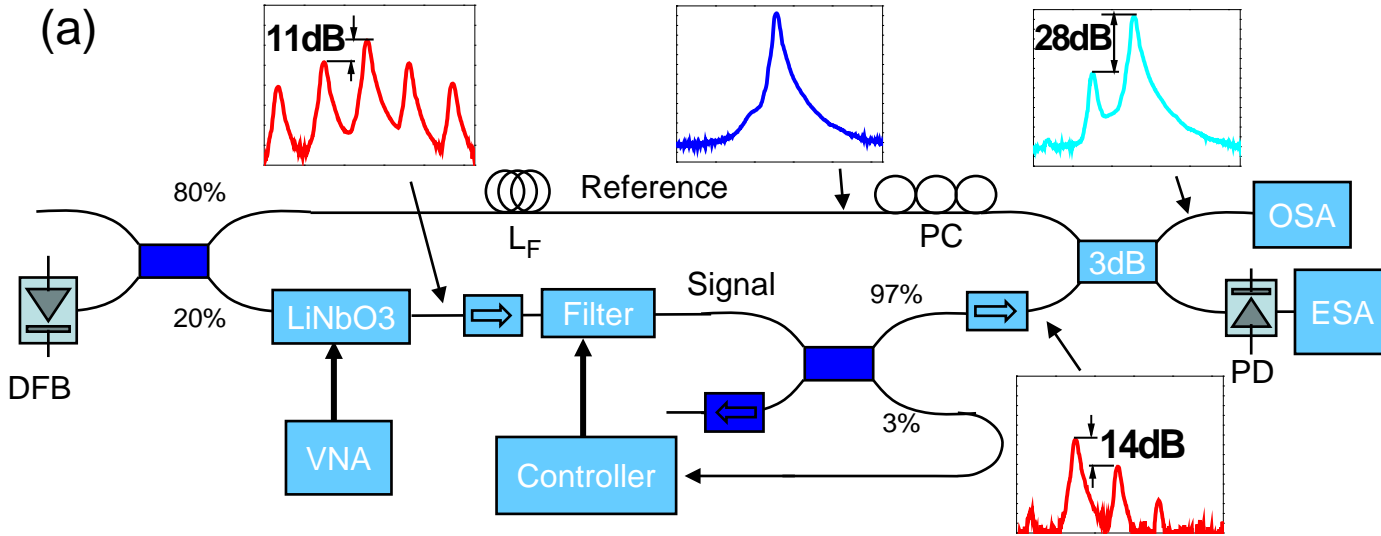


幅度下降，噪声增加



波列间隔远远大于波列线宽

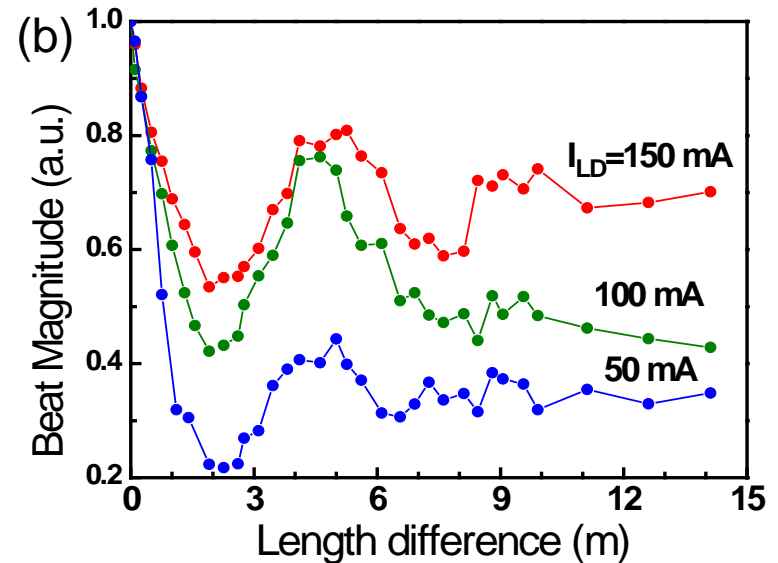
光谱结构：波列时间分布



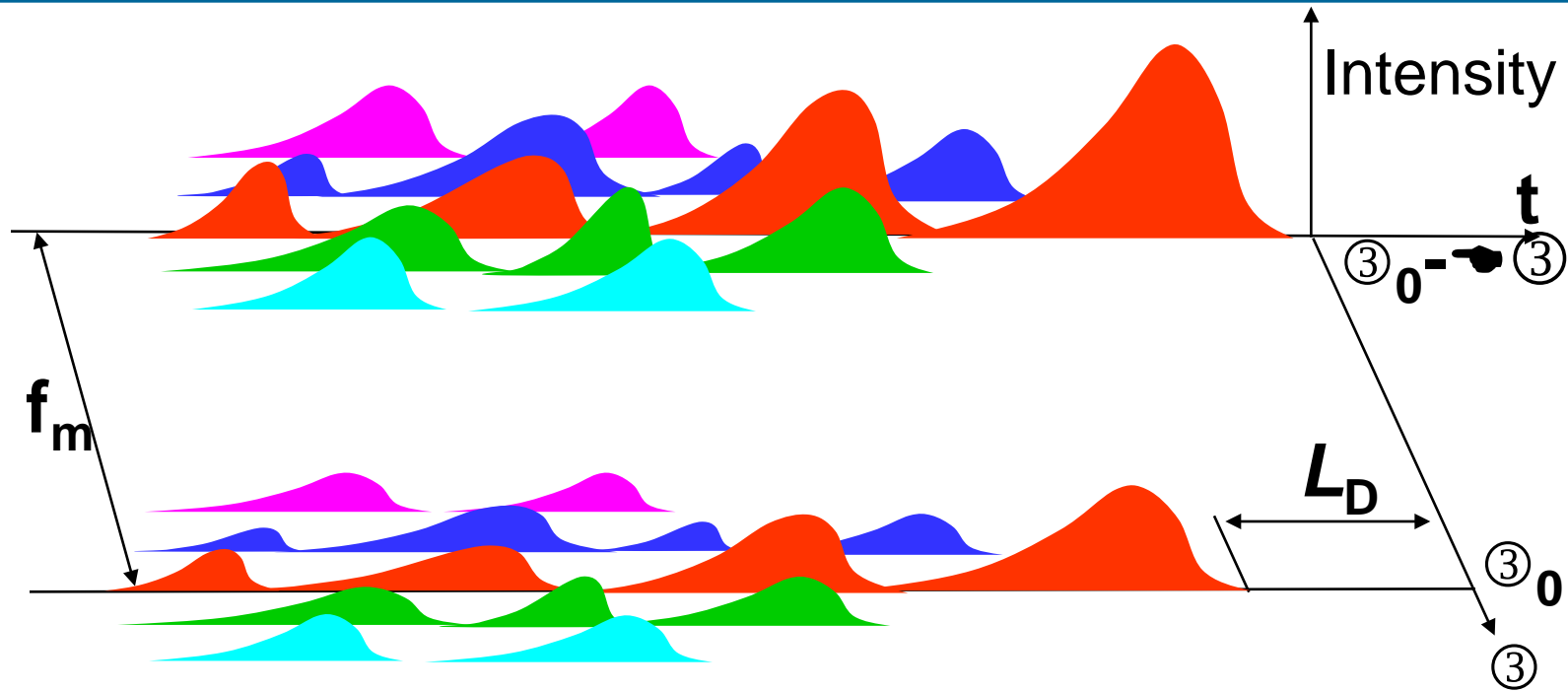
周期
变化

传统方法不能解释的现象！

seeding

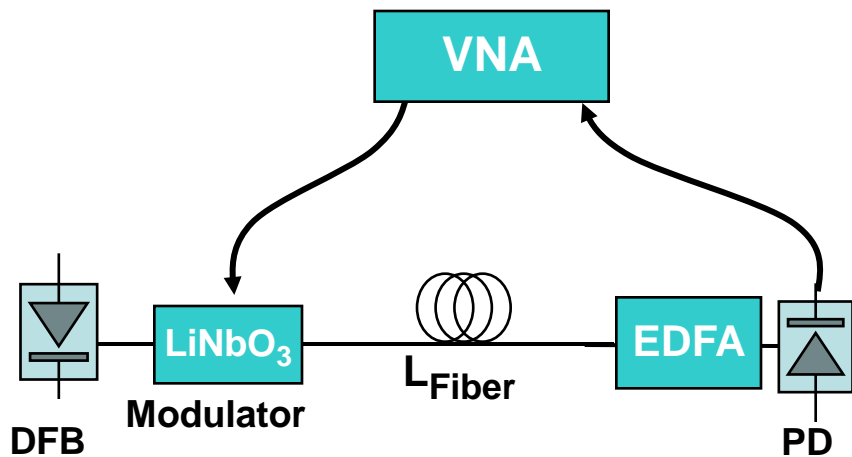
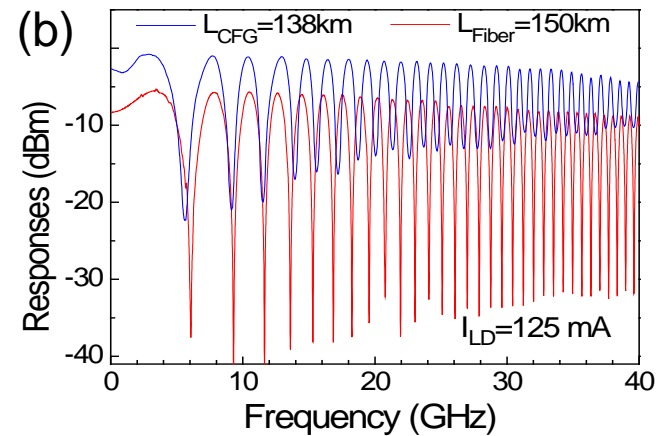
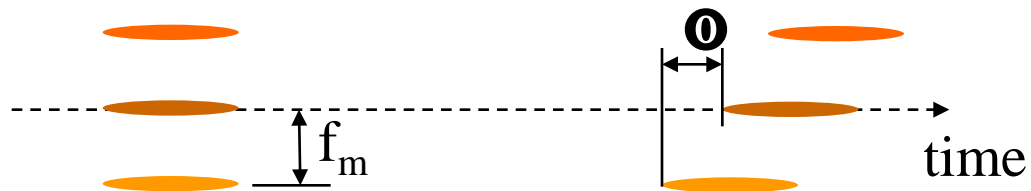


光谱结构：波列时间分布

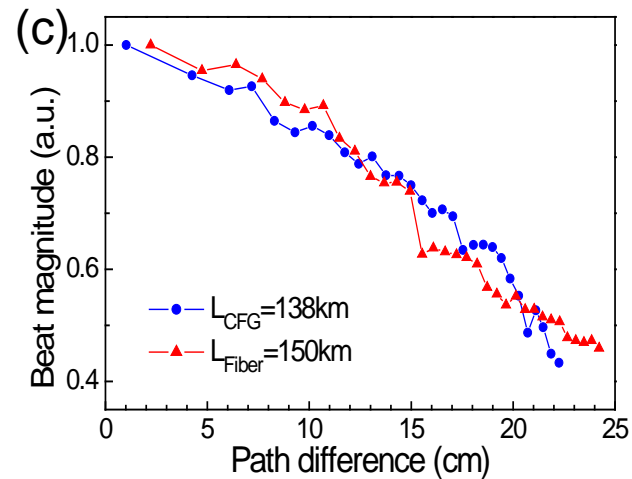


同频率波列一个接一个
两峰值间距为波列长度
时延达到半个波列长度，出现谷点
时延达到一个波列长度，出现低二峰点

光谱结构：波列长度测量



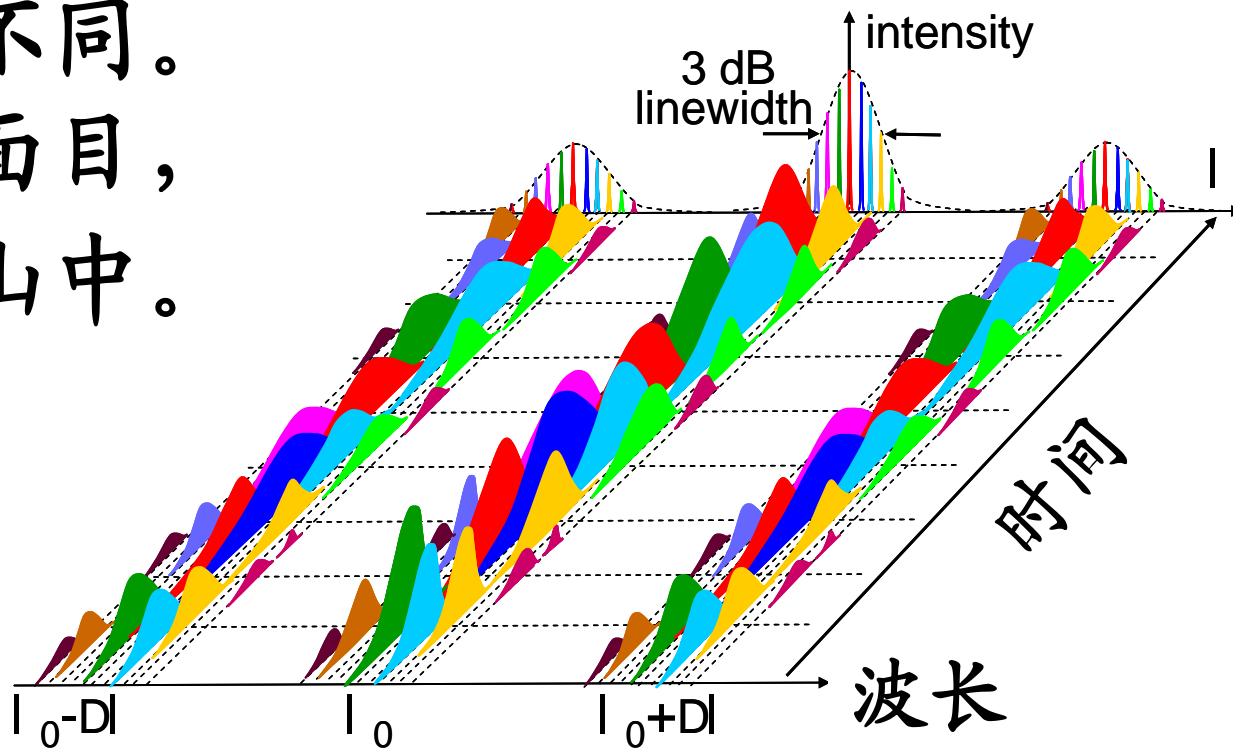
1 ns ~ 30cm



激光器光谱结构

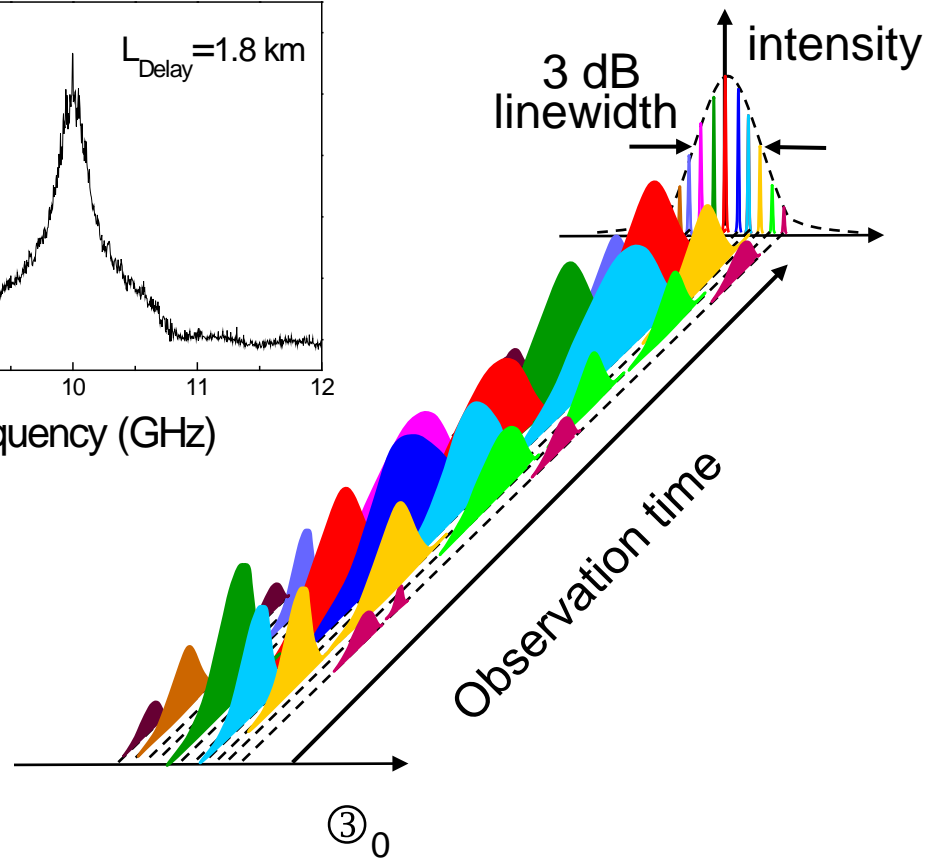
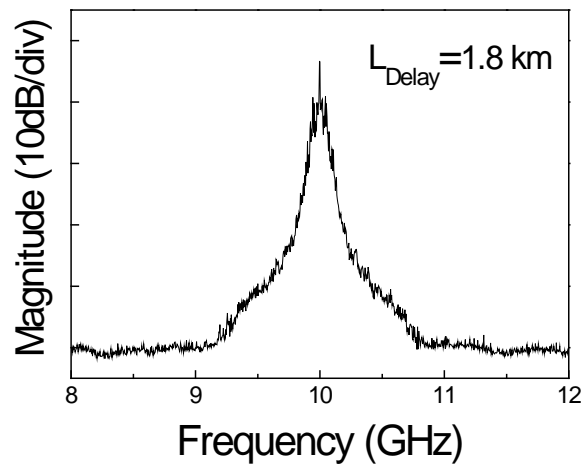
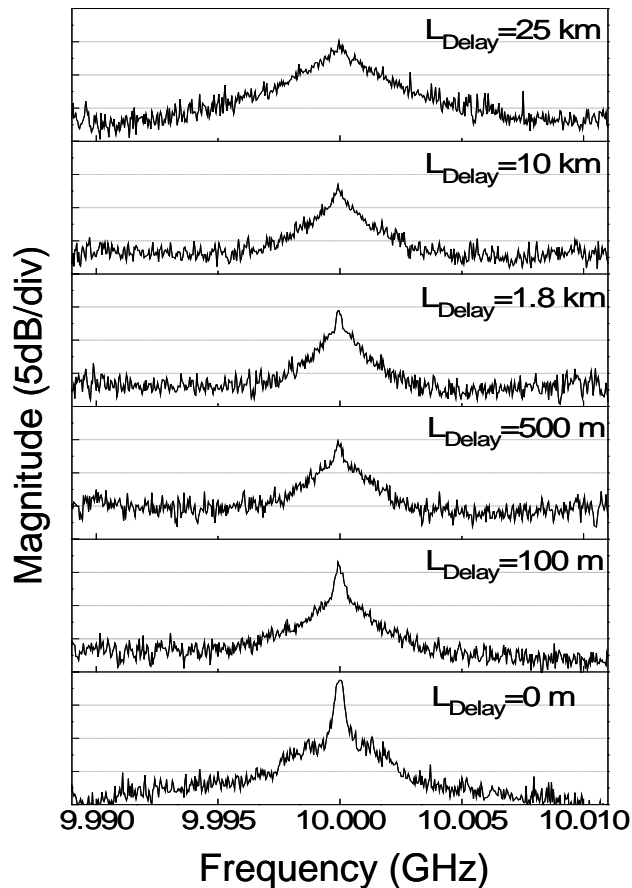
横看成岭侧成峰，
 远近高低各不同。
 不识庐山真面目，
 只缘身在此山中。

波列线宽
 波列间隔
 时间分布
 波列长度



N.H.Zhu, et al., “**Hyperfine spectral structure** of semiconductor lasers,” **Physical Review A**, 76, 063821, 2007

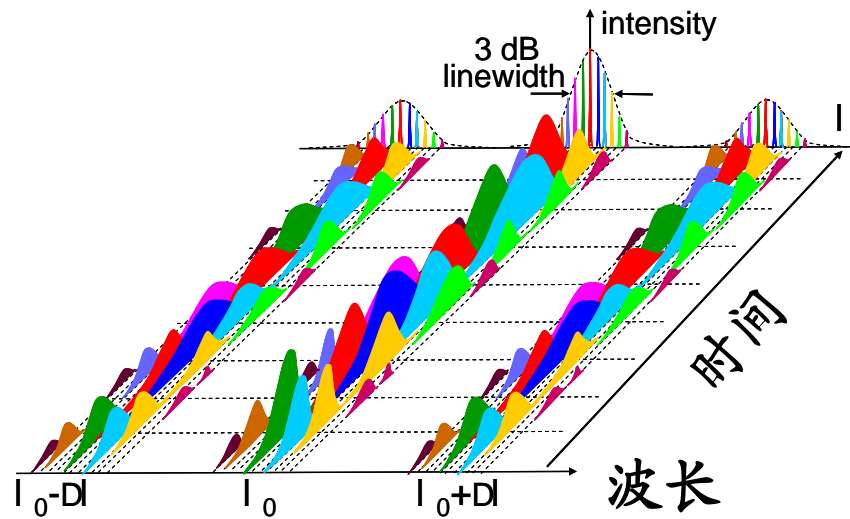
激光器光谱结构



线宽与时延和测试时间有关!

N.H.Zhu, et al., "Lineshape analysis of the beat signal between optical carrier and delayed sidebands," IEEE J. Quantum Electron., 46, 3, 347-353, 2010

光谱结构 → 频率相干



频率相干性新概念

N.H.Zhu, et al., "Study on frequency coherence

properties of light beams,"
IEEE J.Quantum Electron.,
vol.45, no.2, 2009

波列线宽:
< 1mHz

超精细光谱结构模型

N.H.Zhu, et al., "Hyperfine spectral structure of semiconductor lasers," **Physical Review A**, 76, 063821, 2007

光谱结构与频率相干性

- 光谱结构的理解
- 光束频率相干性

频率相干光束特性



什么是频率相干?

熟知的相干性概念:

时间相干, 空间相干, 量子相干,
偏振相干, 谱相干.....

有什么区别? 有什么意义?

频率相干性概念的提出



- L. Mandel and E. Wolf, "Coherence Properties of Optical Fields," Rev. Mod. Phys. vol. 37, pp. 231-287, 1965
- L. Mandel and E. Wolf, "Spectral coherence and the concept of cross-spectral purity," J. Opt. Soc. Am., vol. 66, pp. 529-535, Jun. 1976

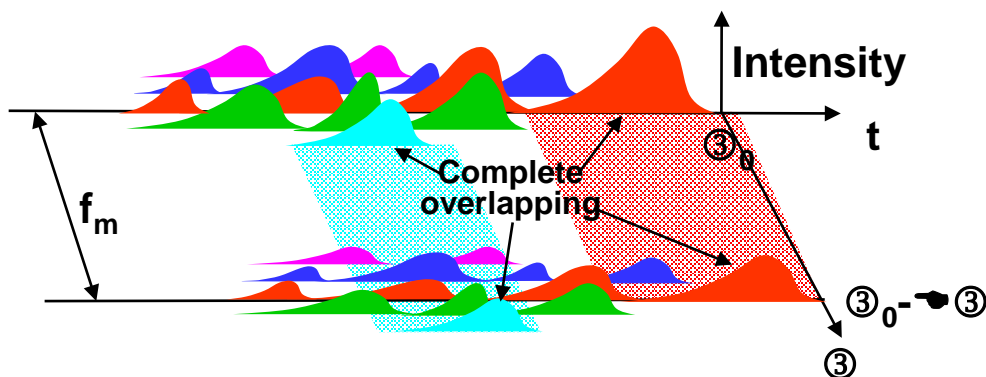
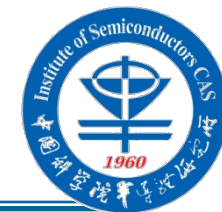
在空间—时间域，或空间—频率域描述相关性

The coherence in the space-frequency domain means the interference of two lightwaves of the same frequency at different points.

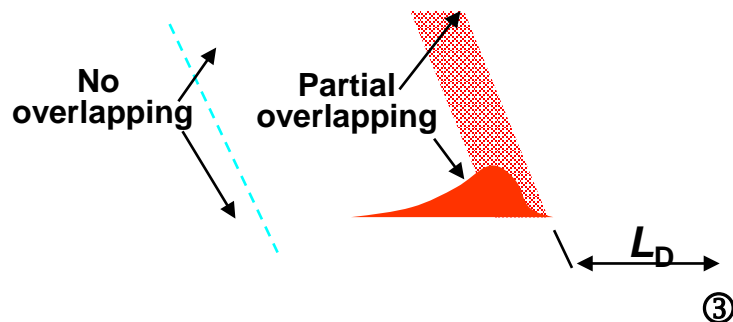
在频率—时间域，波长不同的两束光的相关性

$$g(\omega_1, \omega_2, t) = \int_0^{+\infty} f_a(\omega_1, t) f_b(\omega_2, t) d\omega$$

频率相干光束特性



没有时差，对应
波列完全交叠！
频率完全相干！



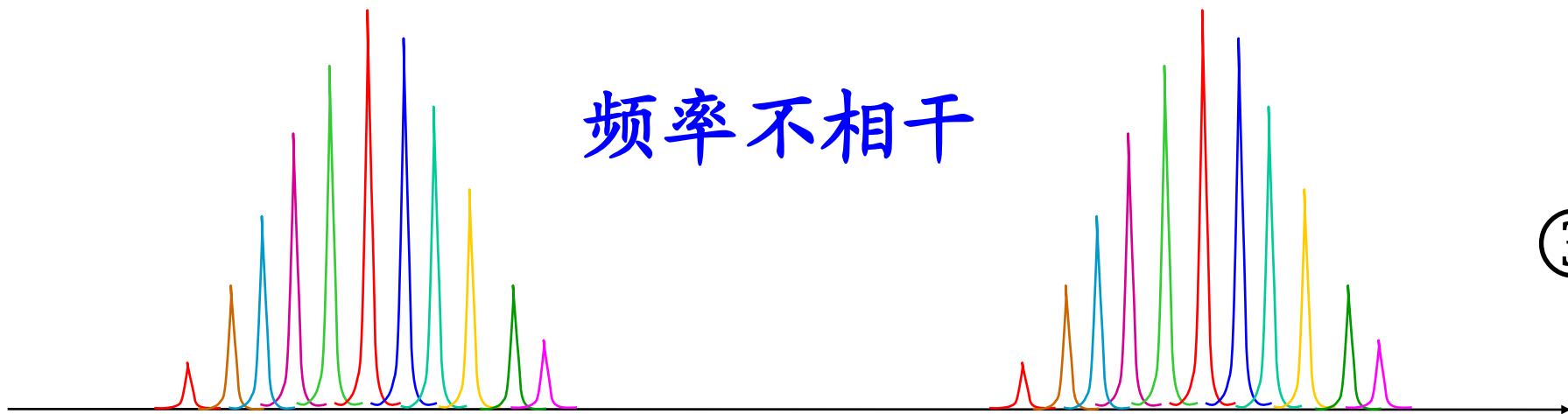
有时差，对应
波列部分交叠！
频率部分相干！

N.H.Zhu, et al., "Lineshape analysis of the beat signal between optical carrier and delayed sidebands," IEEE J.Quantum Electron., vol.46, no.3, 2010.

频率相干光束特点



频率不相干



③

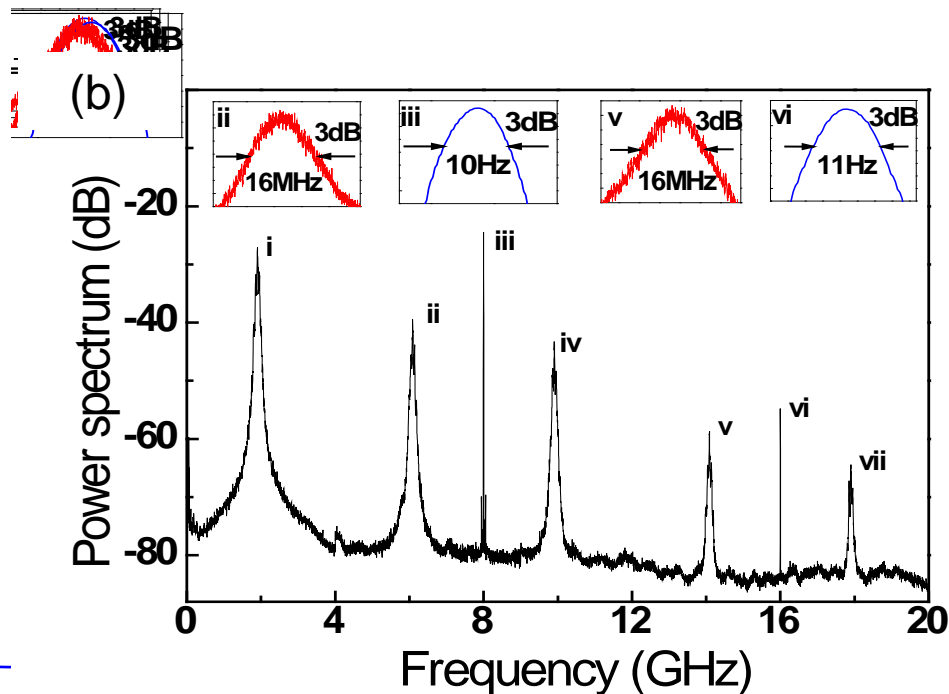
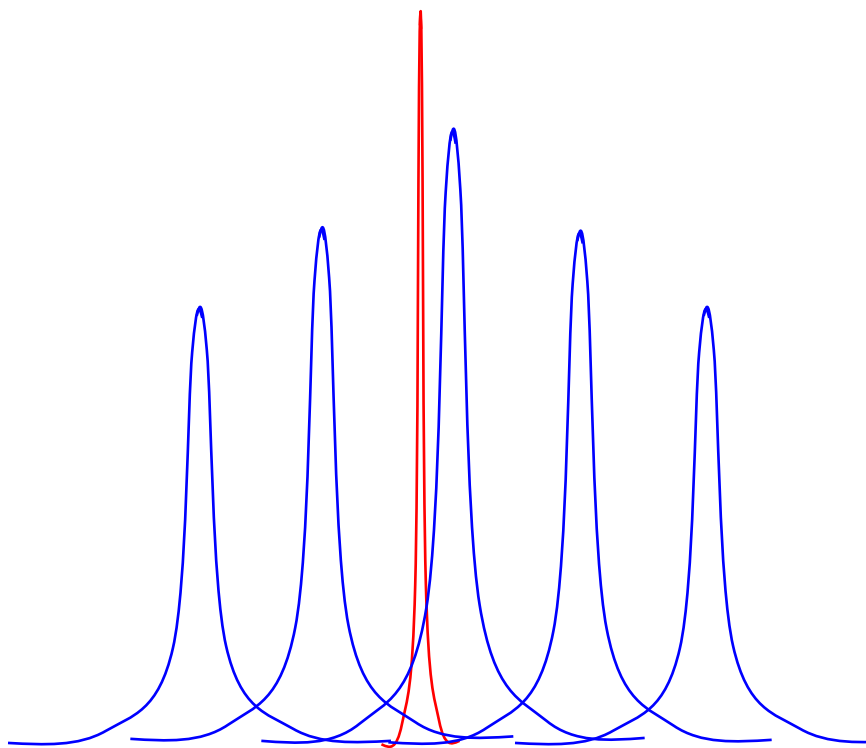
频率相干



③

频率相干的作用

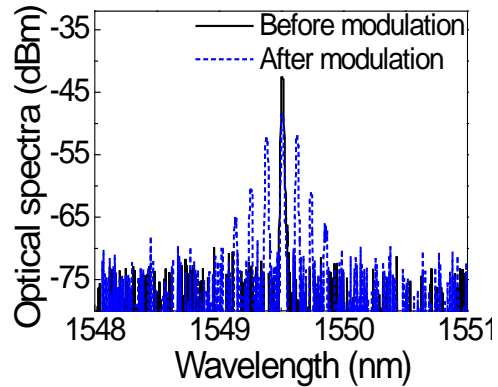
相干光束拍频产生窄线宽微波



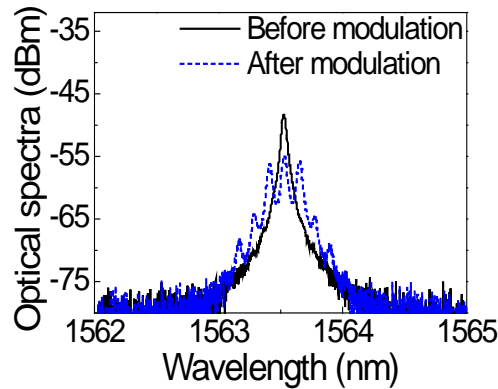
频率相干的作用



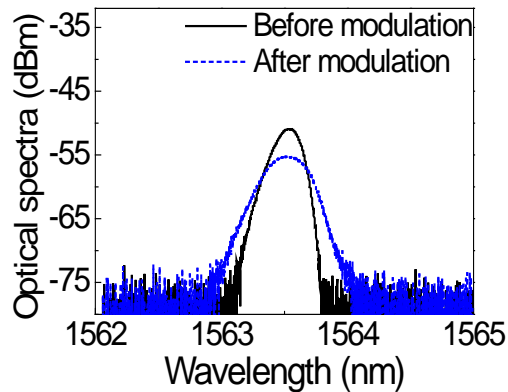
微波线宽与
两束光的谱
宽无关!



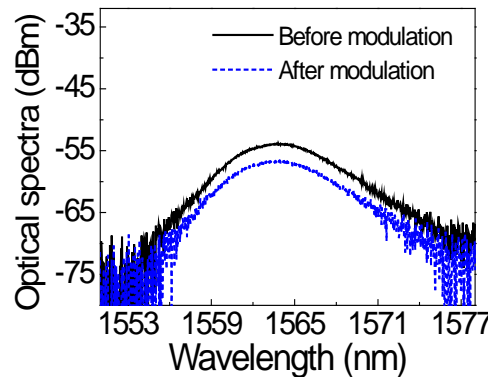
100kHz



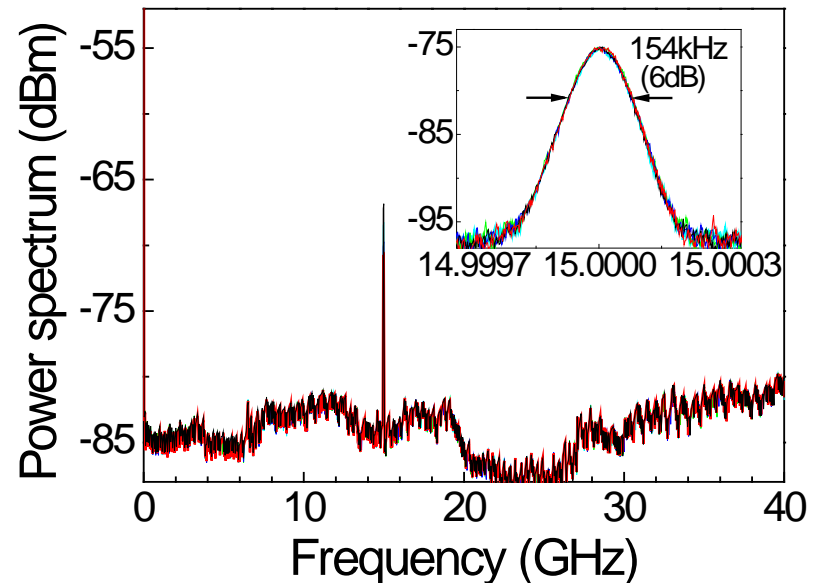
5GHz



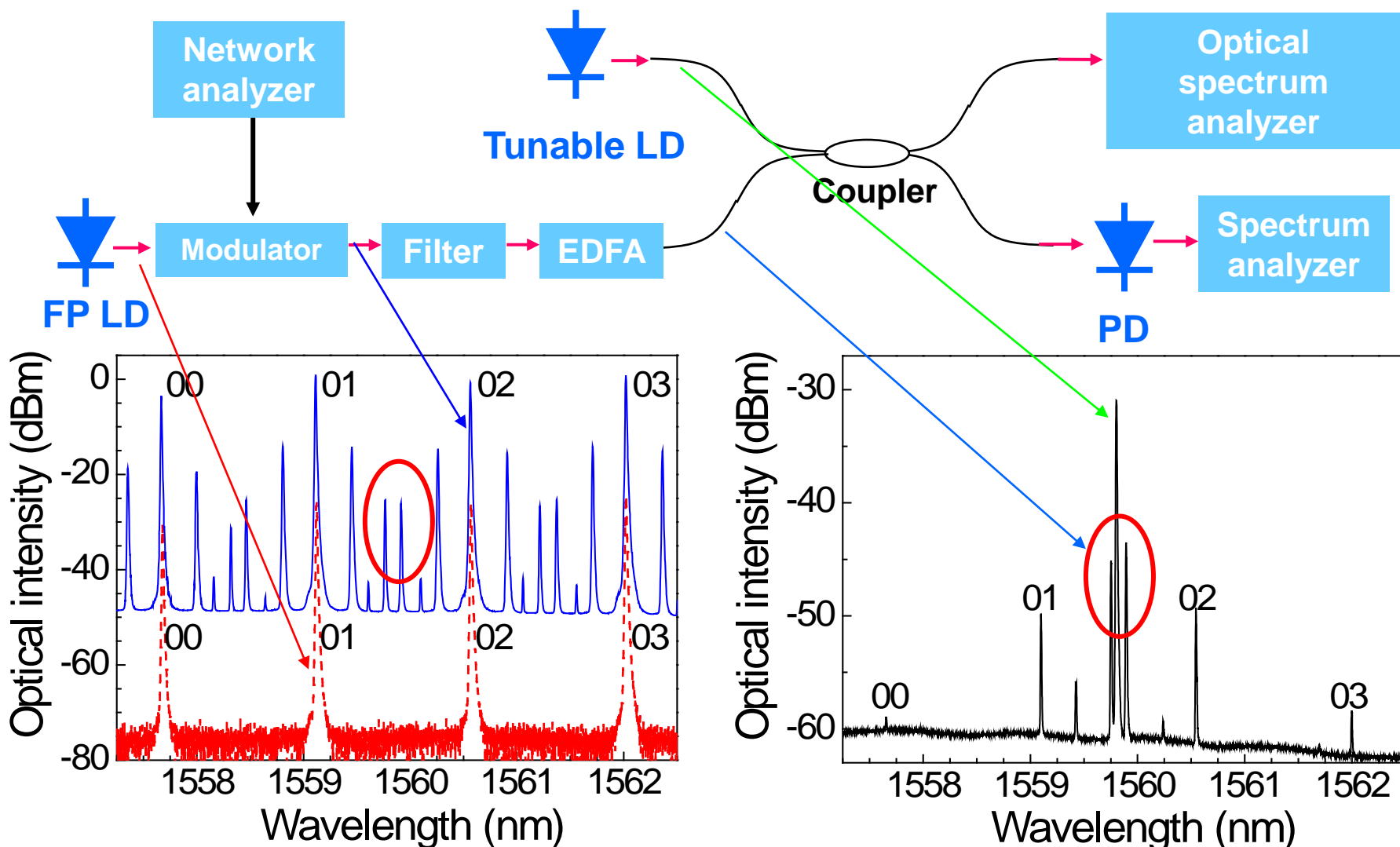
28GHz



5000GHz

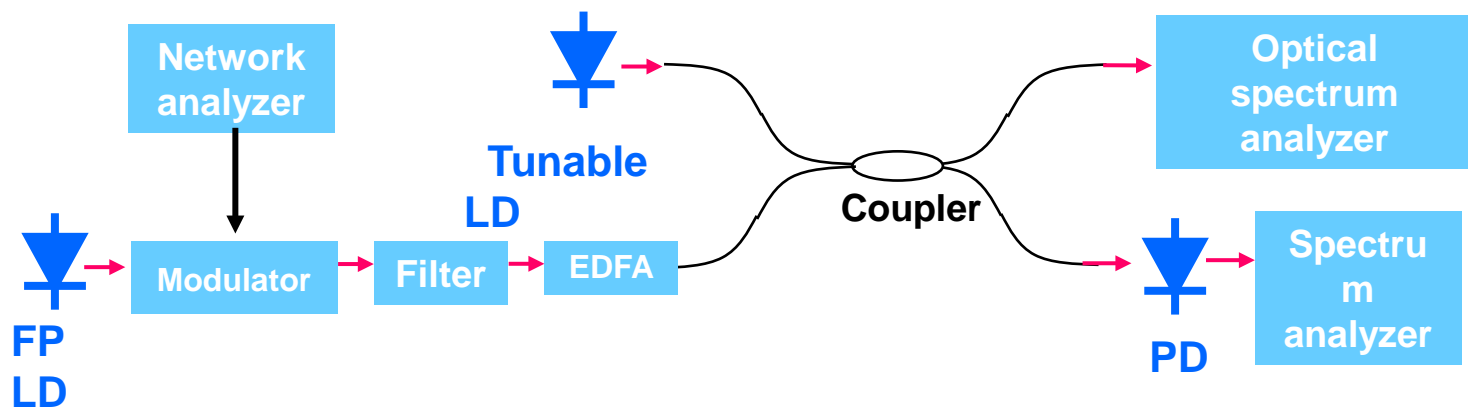


FP激光器模式相干性



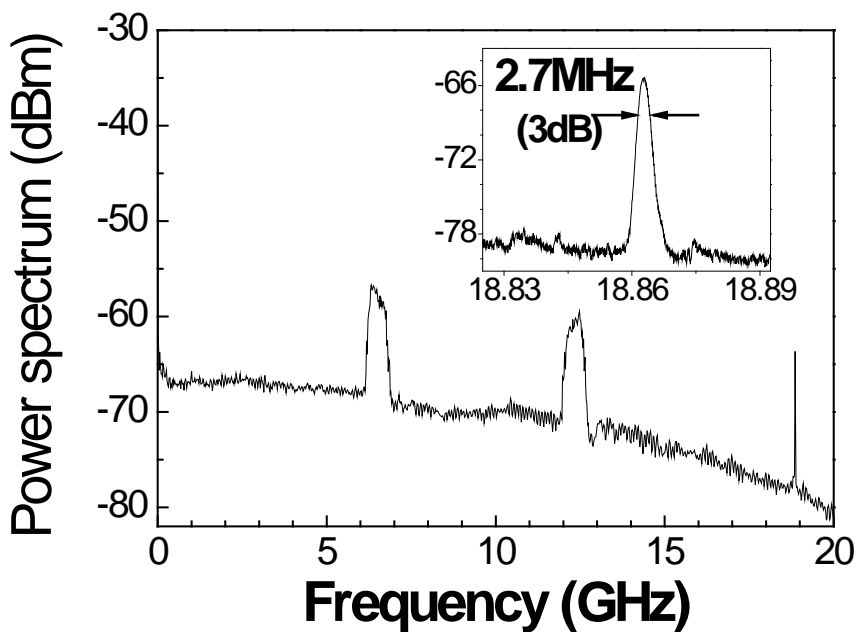
模间距178GHz, 调制移频进入可测量频率范围!

FP激光器模式相干性



模间距178.86GHz
经40GHz调制后，
移频到18.86GHz！

FP激光器FP模式
存在一定相干性



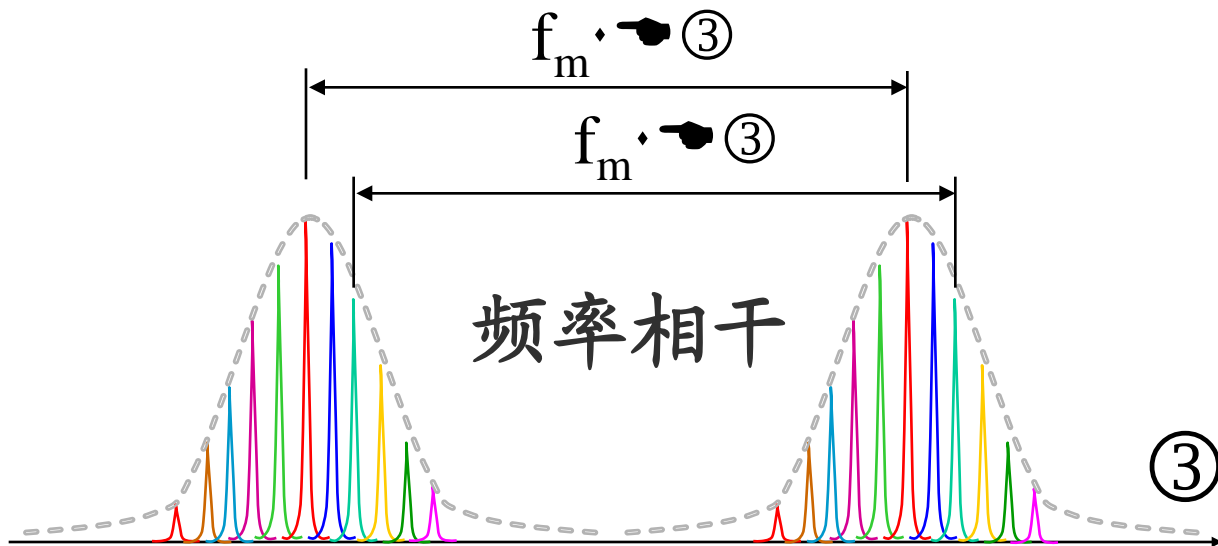
产生窄线宽微波信号方法



传统方式：
压窄光谱线宽！



频率相干
是关键！

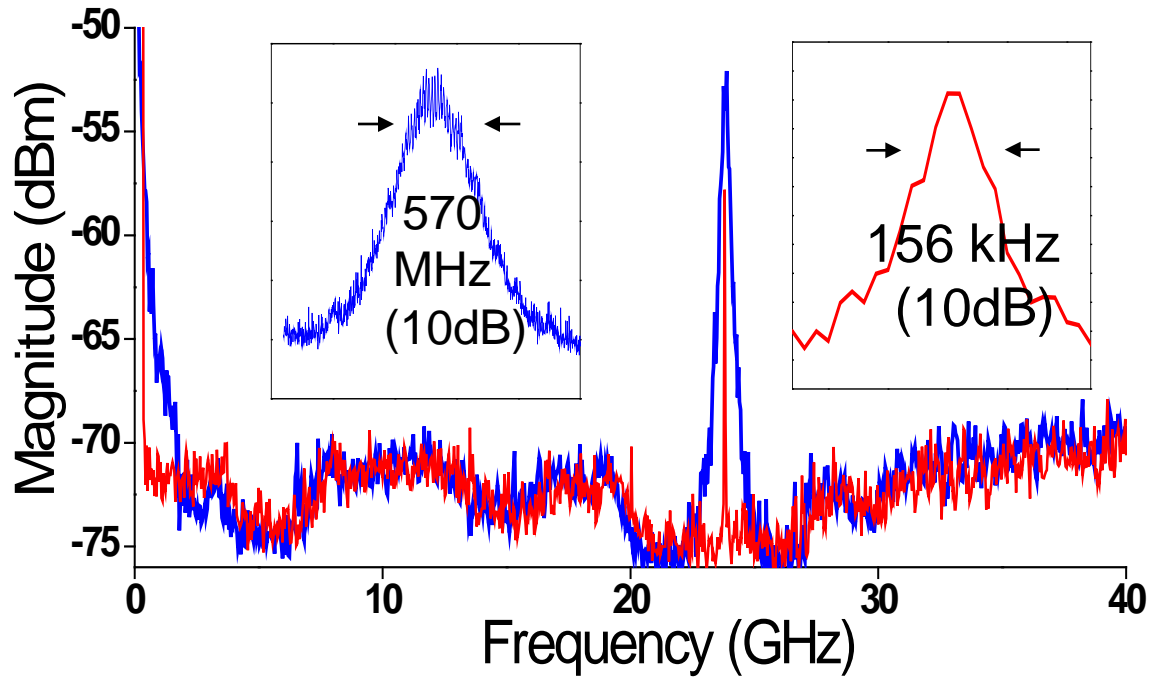
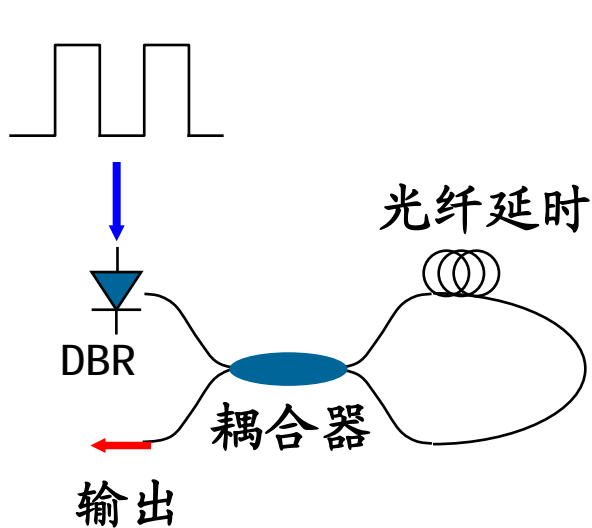


如何实现两束光的频率相干？

实现频率相干的方法



光自注入：与前一时刻输出光关联

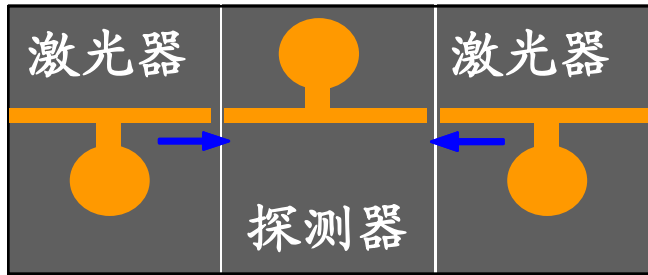


H.G.Zhang, et al., "Narrow-linewidth microwave generation using a self-injected DBR laser diode," IEEE Photon. Technol. Lett., v.21, no.15, 2009.

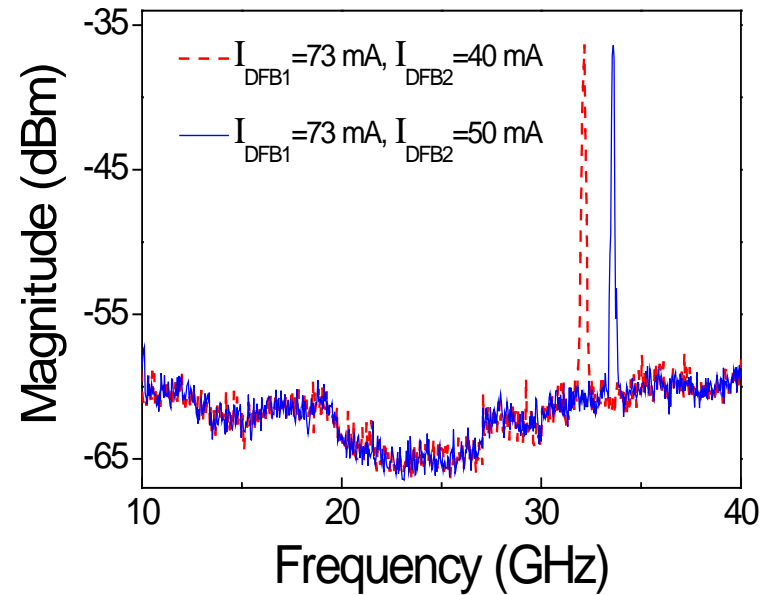
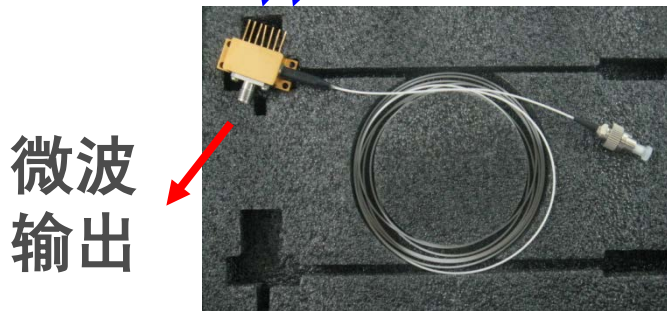
实现频率相干的方法

光外注入: 与另一个激光器关联

↑ 微波信号



电流注入



单片集成微波源

实现频率相干的方法

单片集成微波源

传统扫频微波源:

可调振荡器 + 混频和倍频

YIG调谐
晶体管
振荡器
(3~10GHz)
z)

{

- >10GHz
倍频放大
- 3~10GHz
- <3GHz
混频放大



突出优点: 无需微波谐振腔
宽带、快速调谐

应用: 电子对抗 (快速捕获、干扰)



可能的应用

- 窄线宽微波信号产生
- 激光稳频技术
- 相干通信技术

我的新疑问



- 为什么两束光拍频产生的微波信号的频谱线宽小于光谱线宽？
- 为什么相干长度可达到100km以上？
- 相干长度和光谱线宽是什么关系？

- 观点是否正确？是否与其他理论矛盾 / 冲突？
- 解释是否合理？还有什么物理现象无法理解？
- 应用能否实现？还哪些方向可以进一步拓展？

学术交流



几点浅见，
请批评指正