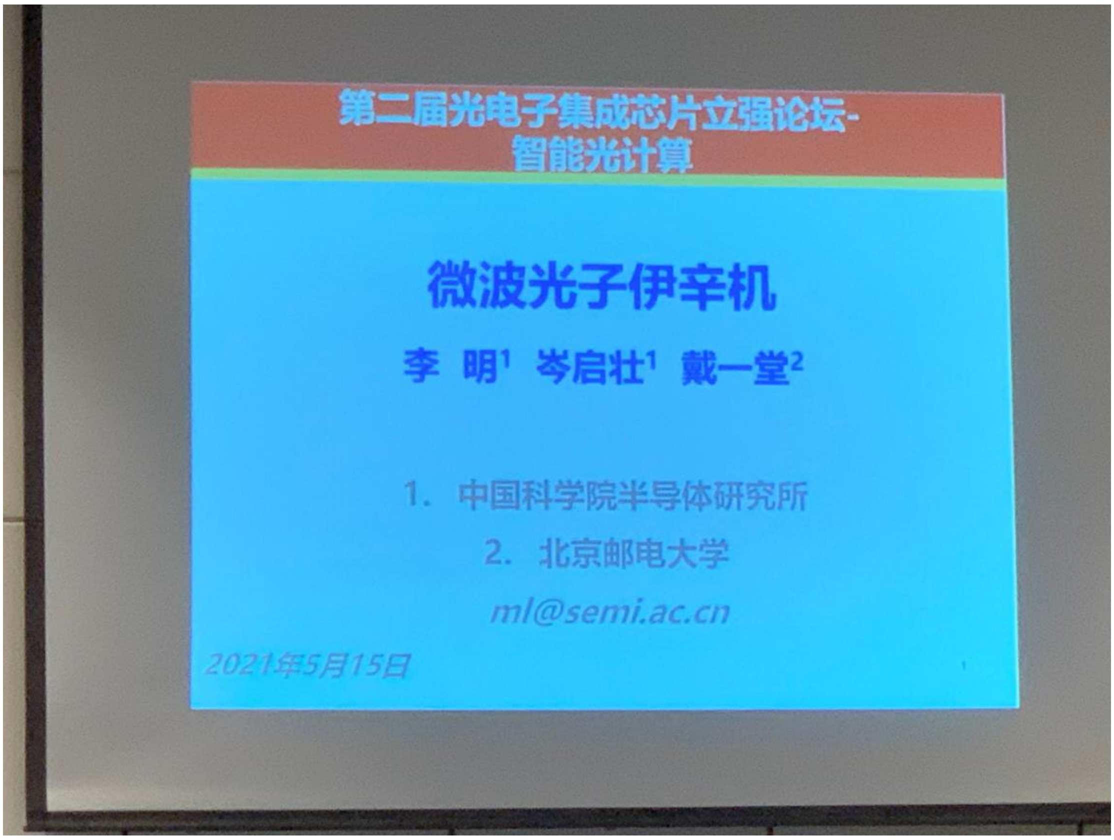
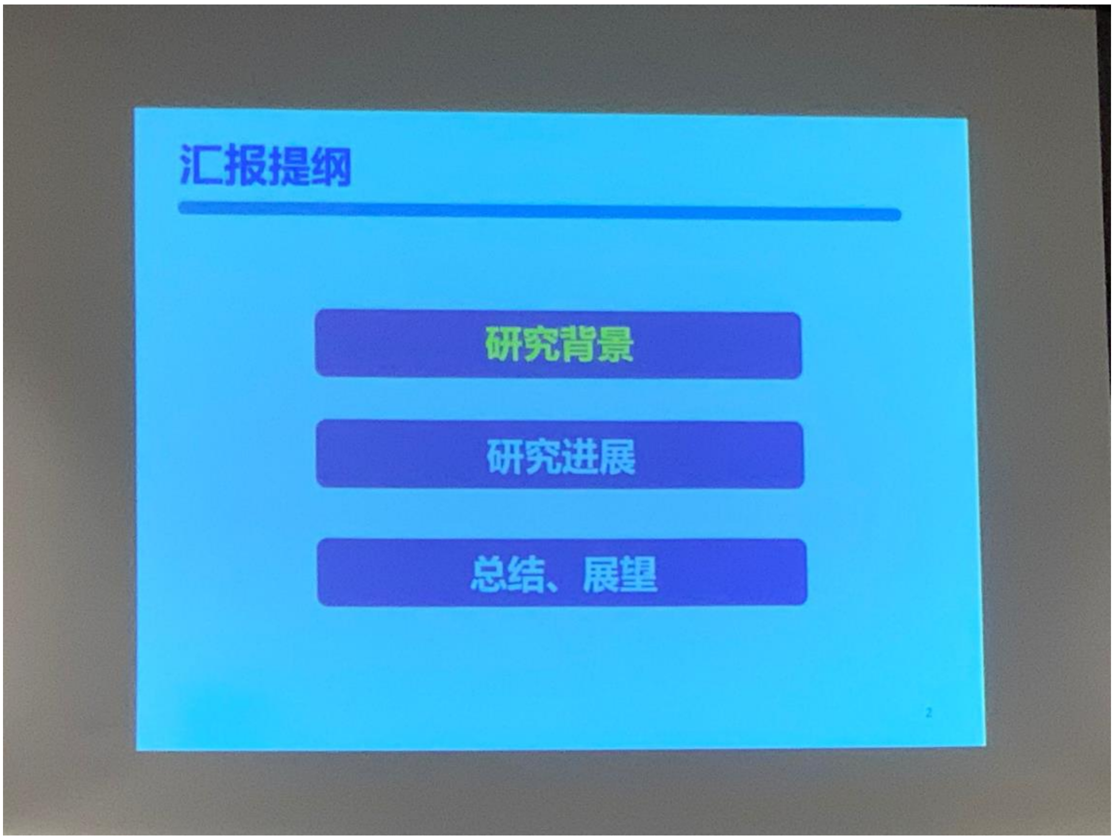
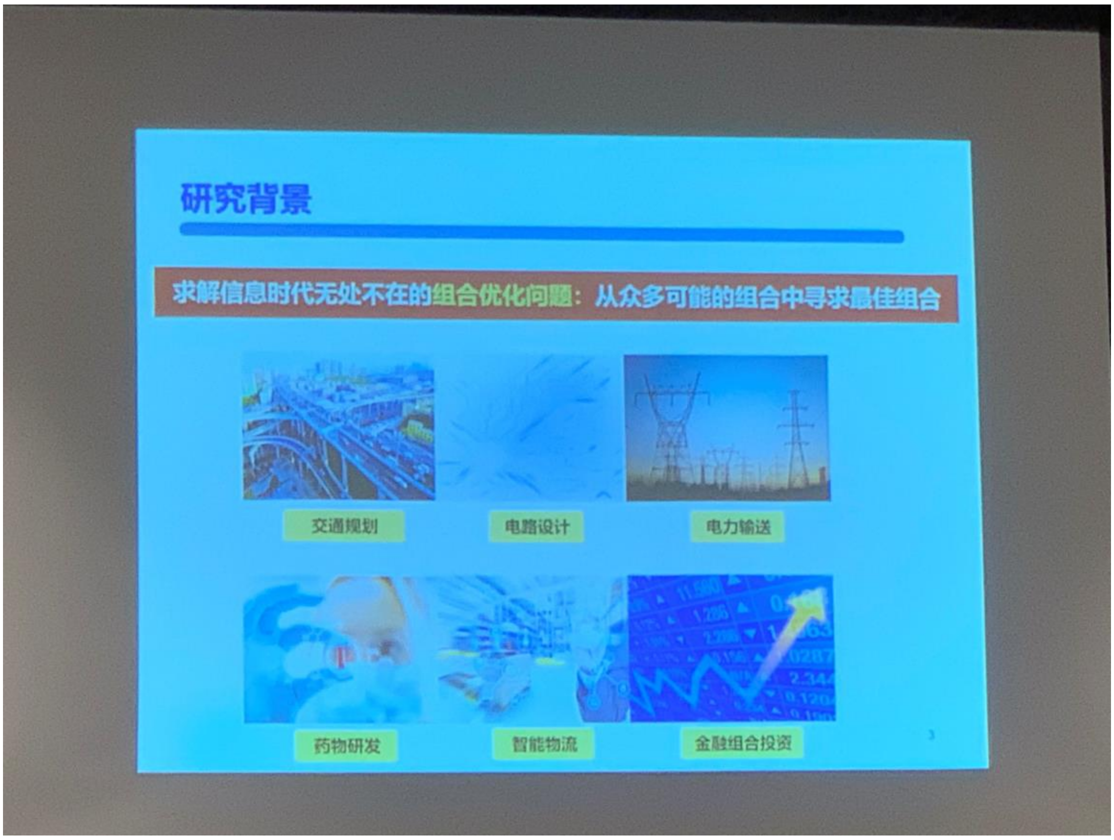
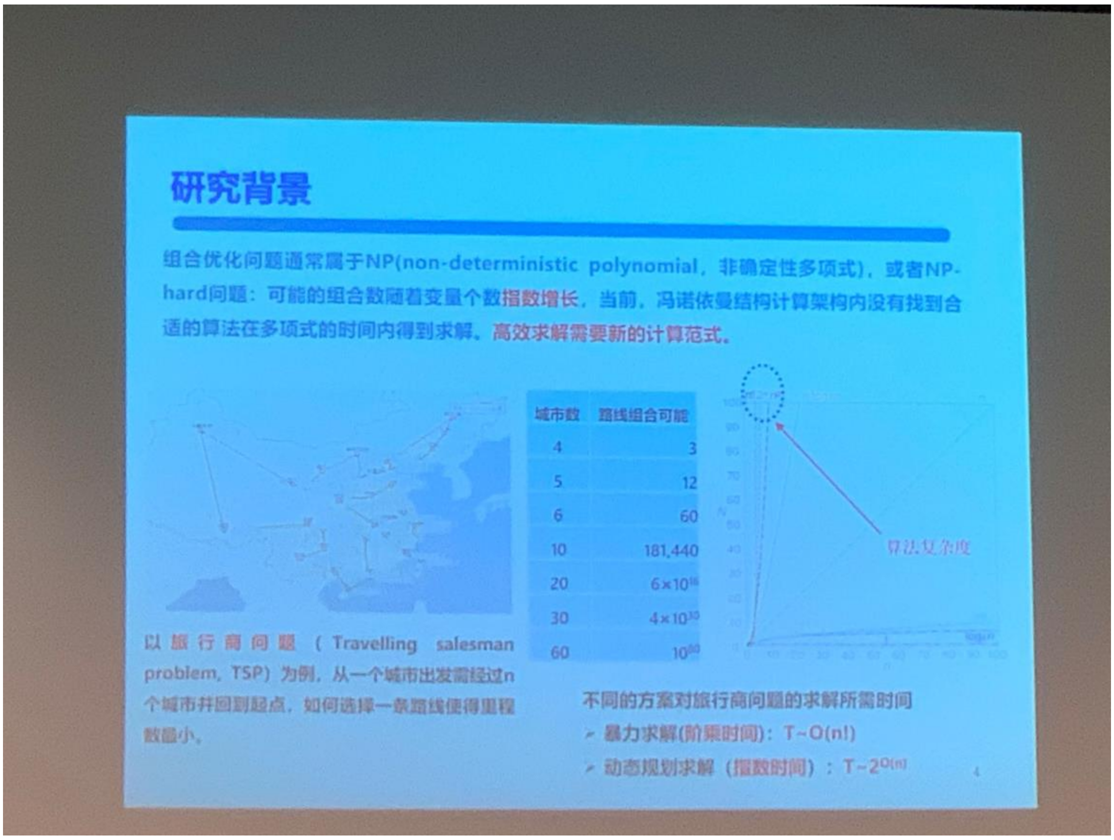
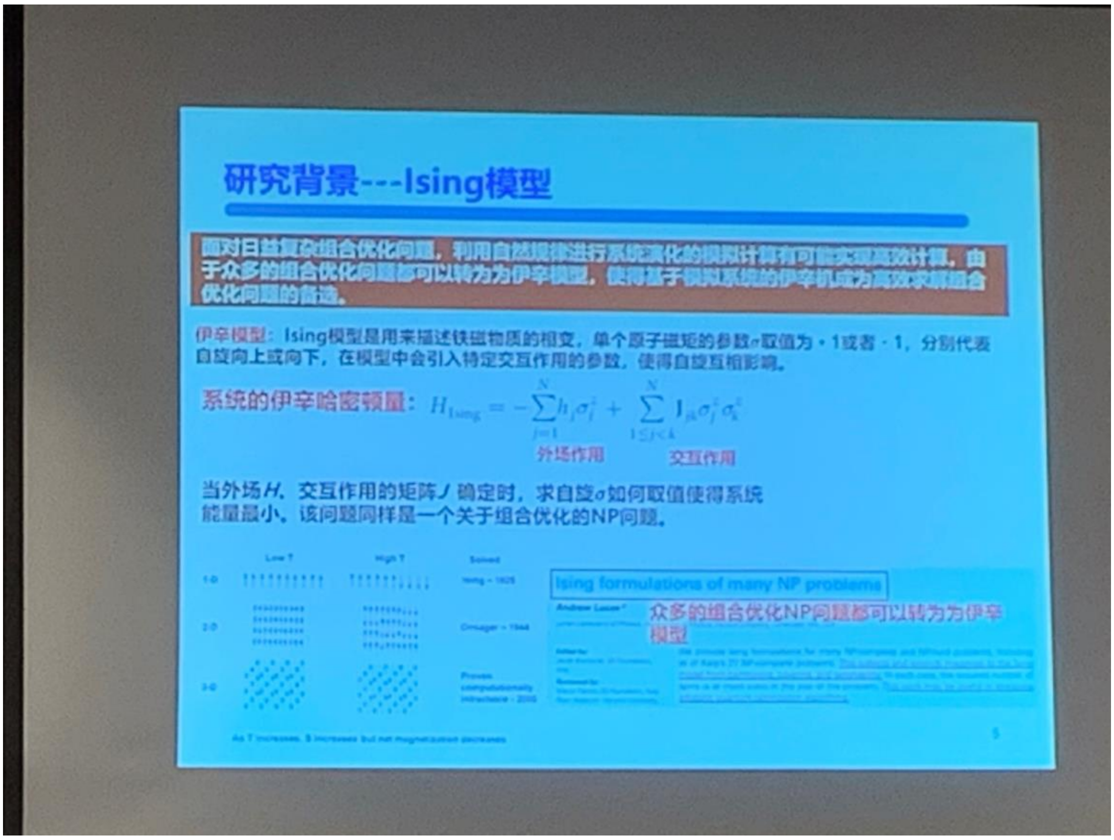
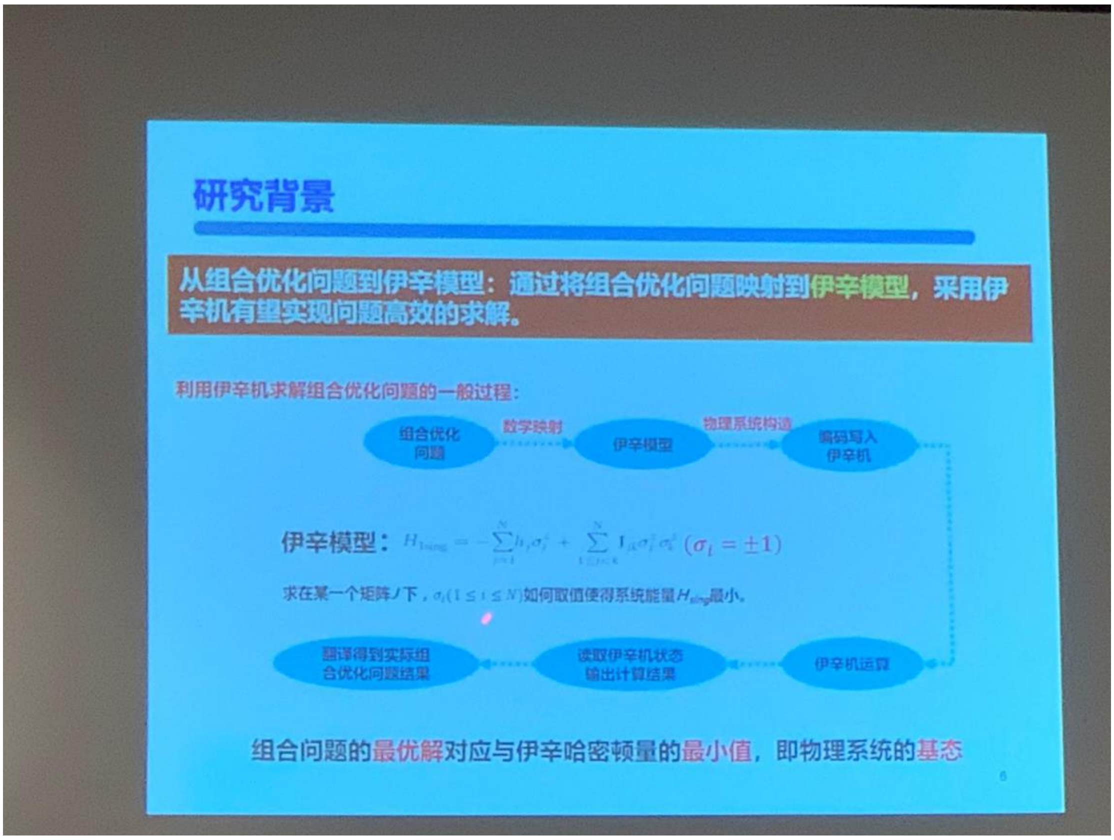

第二届光电子集成芯片立强论坛-
智能光计算
微波光子伊辛机
李 明1 岑启壮1 戴一堂2
1. 中国科学院半导体研究所
2. 北京邮电大学
ml@semi.ac.cn
2021年5月15日

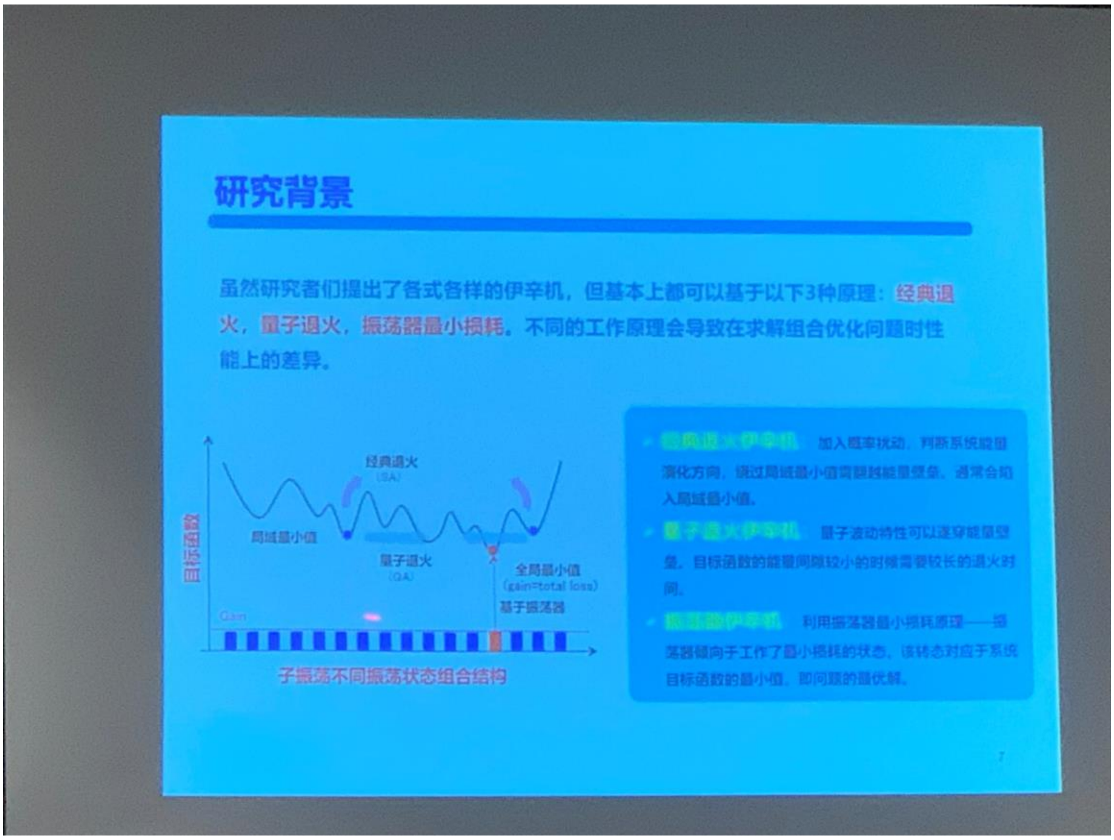

汇报提纲
研究背景
研究进展
总结、展望

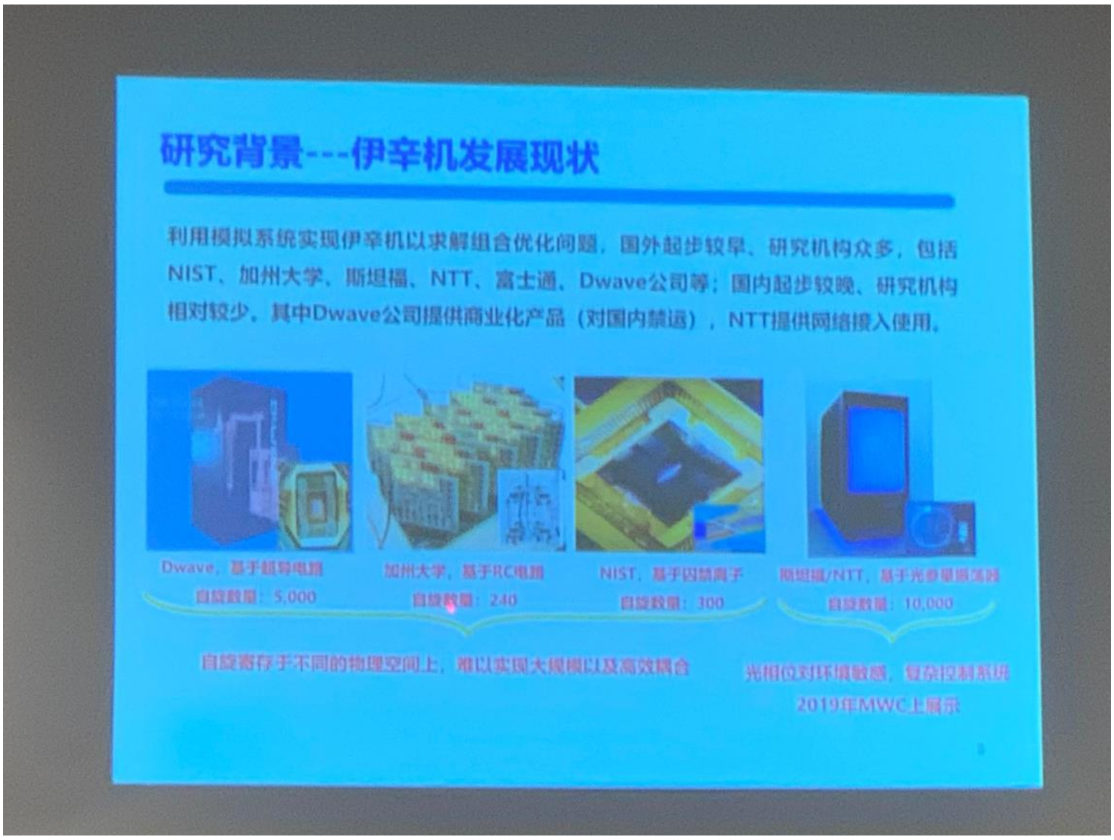

研究背景
求解信息时代无处不在的组合优化问题：从众多可能的组合中寻求最佳组合
交通规划
电路设计
电力输送
药物研发
智能物流
金融组合投资
3

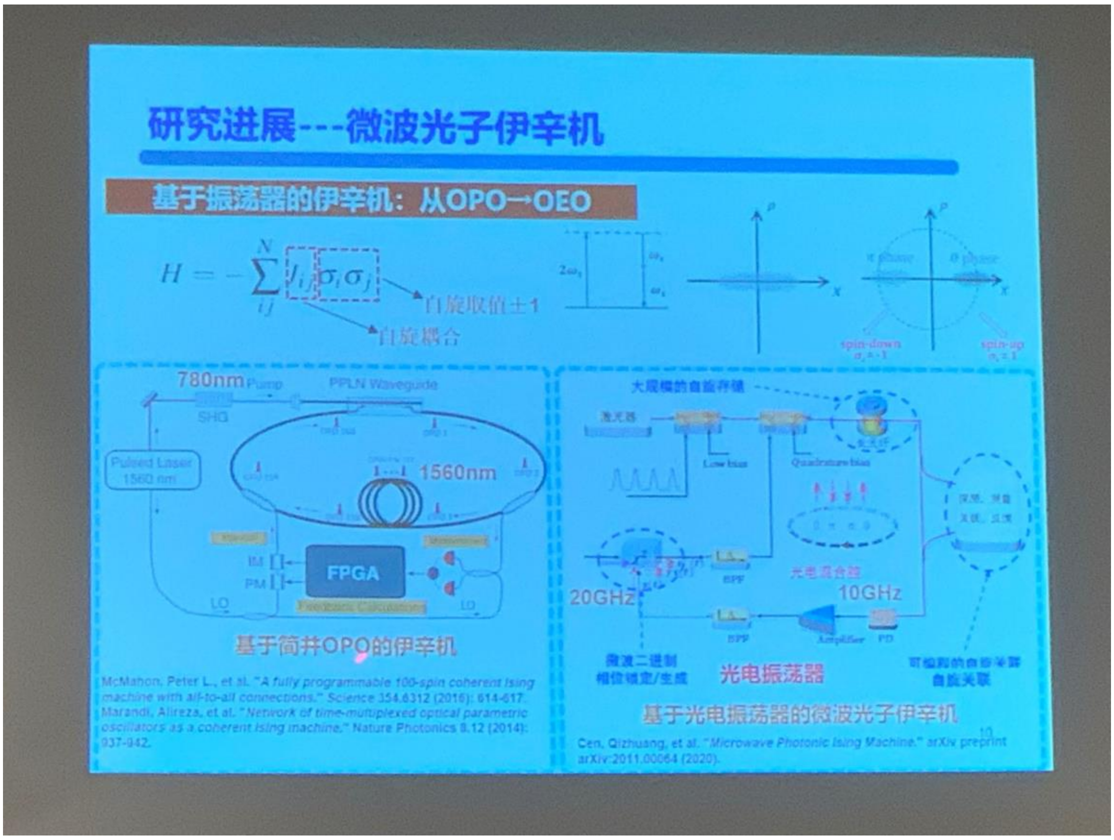

研究背景
组合优化问题通常属于NP(non-deterministic polynomial，非确定性多项式)，或者NP-hard问题：可能的组合数随着变量个数指数增长，当前，冯诺依曼结构计算架构内没有找到合适的算法在多项式的时间内得到求解。高效求解需要新的计算范式。
城市数 | 路线组合可能
4 | 3
5 | 12
6 | 60
10 | 181,440
20 | 6×10^16
30 | 4×10^30
60 | 10^80
算法复杂度
以旅行商问题（Travelling salesman problem，TSP）为例，从一个城市出发需经过n个城市并回到起点，如何选择一条路线使得里程数最小。
不同的方案对旅行商问题的求解所需时间
暴力求解(阶乘时间)：T~O(n!)
动态规划求解（指数时间）：T~2^O(n)
4

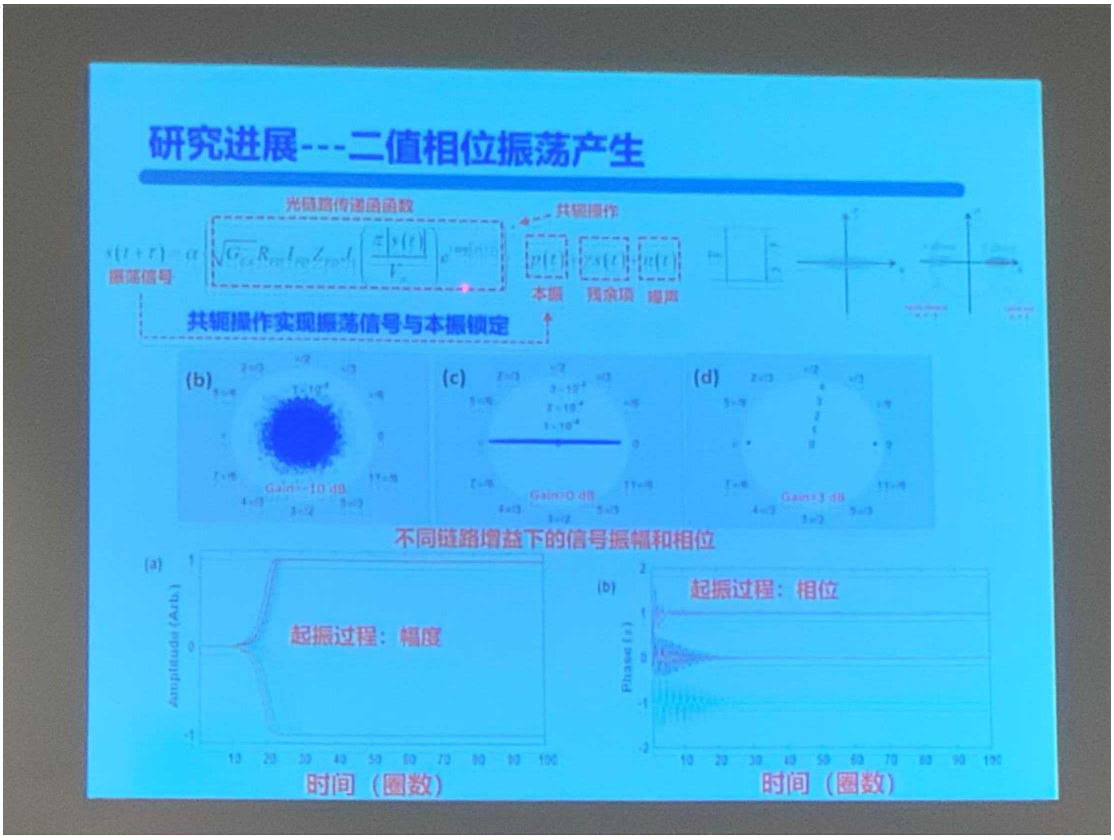

研究背景---Ising模型
面对日益复杂组合优化问题，利用自然规律进行系统演化的模拟计算有可能实现高效计算。由于众多的组合优化问题都可以转为为伊辛模型，使得基于模拟系统的伊辛机成为高效求解组合优化问题的备选。
伊辛模型：Ising模型是用来描述铁磁物质的相变，单个原子磁矩的参数σ取值为+1或者-1，分别代表自旋向上或向下，在模型中会引入特定交互作用的参数，使得自旋互相影响。
系统的伊辛哈密顿量：$H_{\text{Ising}} = -\sum_{j=1}^{N} h_j \sigma_j^z + \sum_{1 \le j < k}^{N} J_{jk} \sigma_j^z \sigma_k^z$
外场作用
交互作用
当外场H、交互作用的矩阵J 确定时，求自旋σ如何取值使得系统能量最小。该问题同样是一个关于组合优化的NP问题。
Ising formulations of many NP problems
众多的组合优化NP问题都可以转为为伊辛模型
5

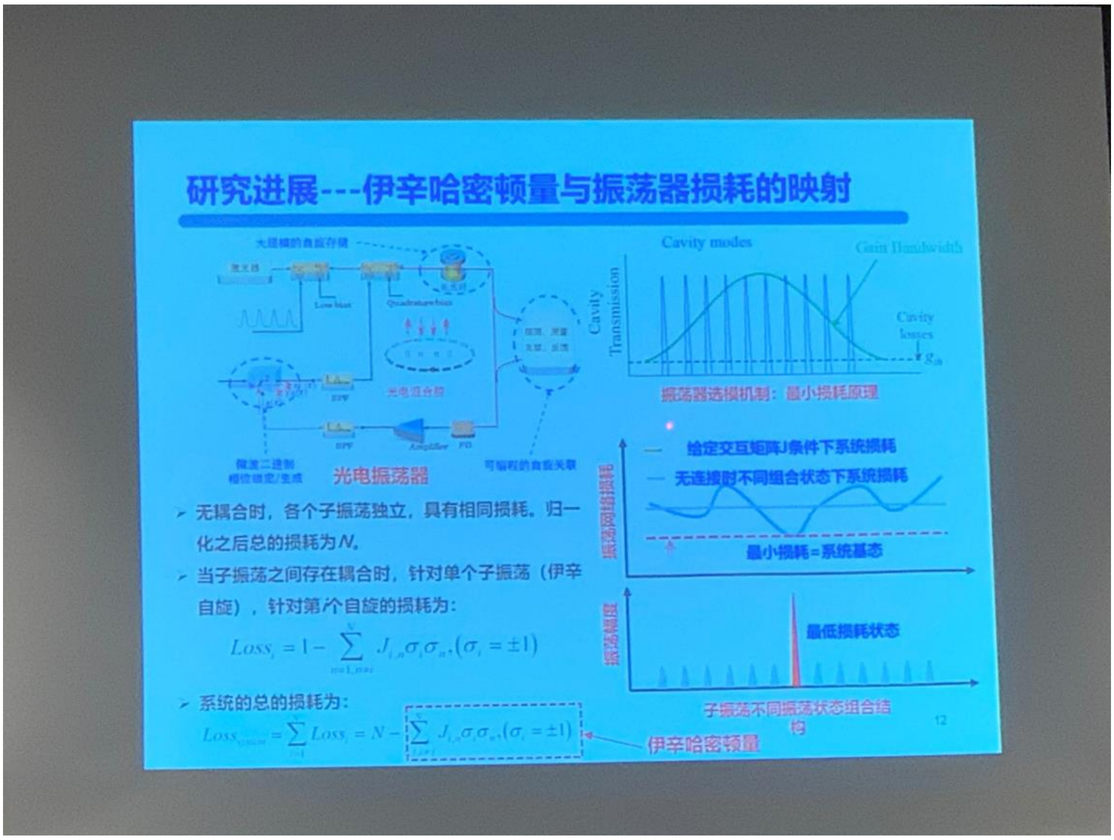

研究背景
从组合优化问题到伊辛模型：通过将组合优化问题映射到伊辛模型，采用伊辛机有望实现问题高效的求解。
利用伊辛机求解组合优化问题的一般过程：
组合优化问题
数学映射
伊辛模型
物理系统构造
编码写入伊辛机
伊辛模型：$H_{\text{Ising}} = -\sum_{j=1}^{N} h_j \sigma_j^z + \sum_{1 \le j < k}^{N} J_{jk} \sigma_j^z \sigma_k^z \ (\sigma_i = \pm 1)$
求在某一个矩阵J下，$\sigma_i (1 \le i \le N)$如何取值使得系统能量H_{Ising}最小。
翻译得到实际组合优化问题结果
读取伊辛机状态输出计算结果
伊辛机运算
组合问题的最优解对应与伊辛哈密顿量的最小值，即物理系统的基态
6

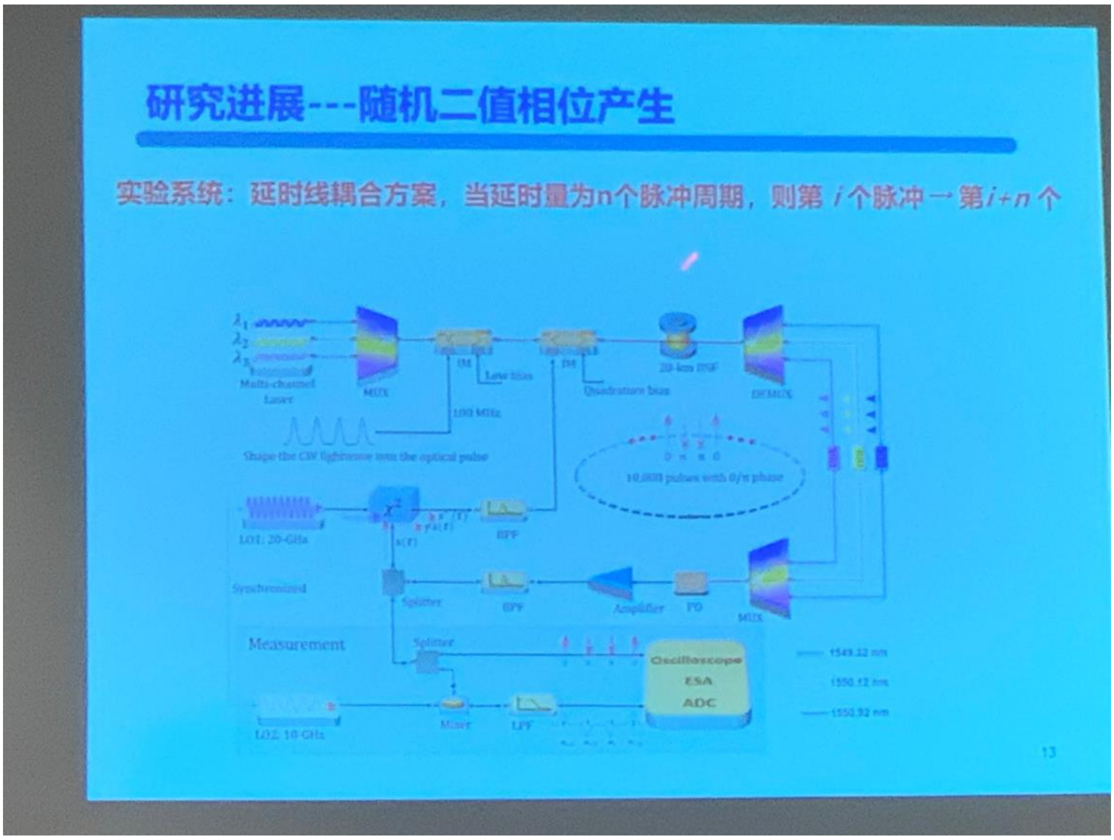

研究背景
虽然研究者们提出了各式各样的伊辛机，但基本上都可以基于以下3种原理：经典退火，量子退火，振荡器最小损耗。不同的工作原理会导致在求解组合优化问题时性能上的差异。
目标函数
经典退火
(SA)
局域最小值
量子退火
(QA)
全局最小值
(gain=total loss)
基于振荡器
Gain
子振荡不同振荡状态组合结构
经典退火伊辛机 加入概率扰动，判断系统能量演化方向，须过局域最小值需要越能量壁垒，通常会陷入局域最小值。
量子退火伊辛机 量子波动特性可以逐穿能量壁垒，目标函数的能量间隙较小的时候需要较长的退火时间。
振荡器伊辛机 利用振荡器最小损耗原理——振荡器倾向于工作了最小损耗的状态，该状态对应于系统目标函数的最小值，即问题的最优解。
7

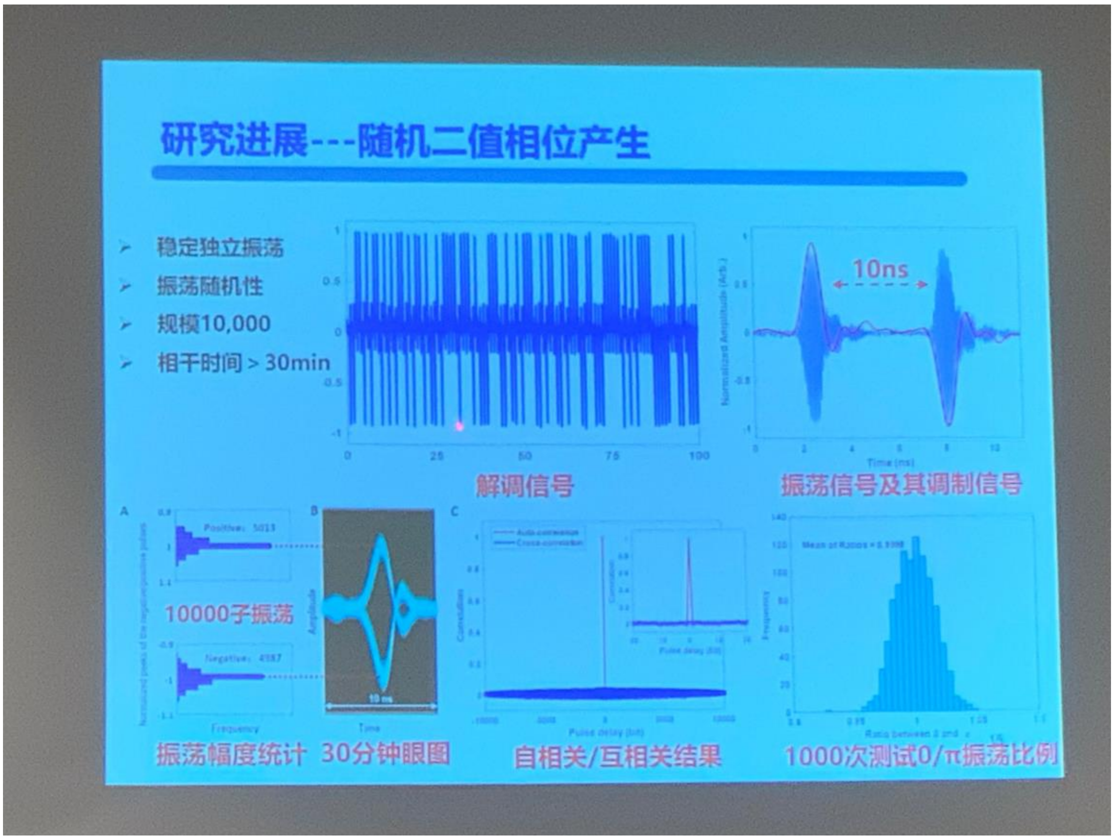

研究背景---伊辛机发展现状
利用模拟系统实现伊辛机以求解组合优化问题，国外起步较早、研究机构众多，包括NIST、加州大学、斯坦福、NTT、富士通、Dwave公司等；国内起步较晚、研究机构相对较少。其中Dwave公司提供商业化产品（对国内禁运），NTT提供网络接入使用。
Dwave，基于超导电路
自旋数量：5,000
加州大学，基于RC电路
自旋数量：240
NIST，基于囚禁离子
自旋数量：300
斯坦福/NTT，基于光参量振荡器
自旋数量：10,000
自旋寄存于不同的物理空间上，难以实现大规模以及高效耦合
光相位对环境敏感，复杂控制系统
2019年MWC上展示
8


研究进展---微波光子伊辛机
基于振荡器的伊辛机：从OPO→OEO
$H=-\sum_{ij}^{N} J_{ij}\sigma_i\sigma_j$
自旋取值±1
自旋耦合
spin-down
spin-up
780nm Pump
PPLN Waveguide
SHG
Pulsed Laser 1560 nm
1560nm
IM
PM
FPGA
LO
Feedback Calculation
基于简并OPO的伊辛机
McMahon, Peter L., et al. "A fully programmable 100-spin coherent Ising machine with all-to-all connections." Science 354.6312 (2016): 614-617.
Marandi, Alireza, et al. "Network of time-multiplexed optical parametric oscillators as a coherent Ising machine." Nature Photonics 8.12 (2014): 937-942.
大规模的自旋存储
激光器
Low bias
Quadrature bias
BPF
20GHz
10GHz
Amplifier
PD
光电混合路
微波二进制
相位锁定/生成
光电振荡器
可编程的自旋半群
自旋关联
基于光电振荡器的微波光子伊辛机
Cen, Qizhuang, et al. "Microwave Photonic Ising Machine." arXiv preprint arXiv:2011.00064 (2020).
10

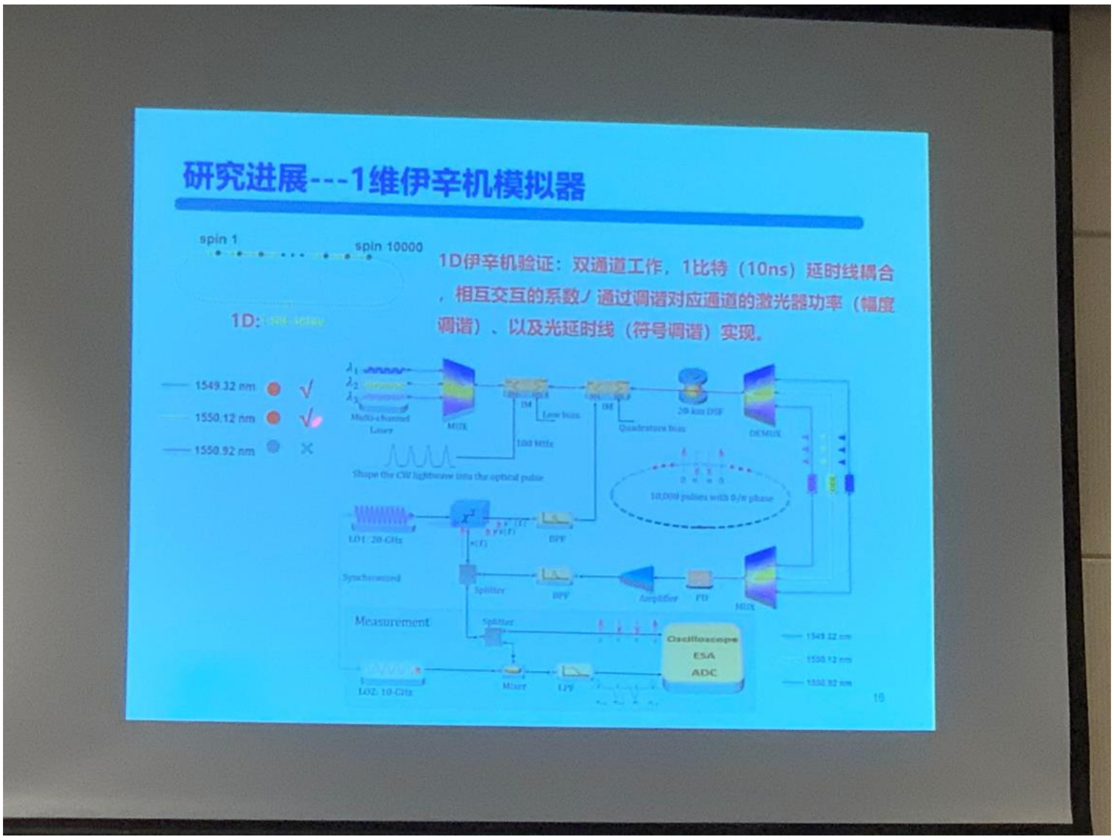

研究进展---二值相位振荡产生
光链路传递函数
共轭操作
振荡信号
本振
残余项
噪声
共轭操作实现振荡信号与本振锁定
(b)
(c)
(d)
Gain=-10 dB
Gain=0 dB
Gain=3 dB
不同链路增益下的信号振幅和相位
(a)
Amplitude (Arb.)
起振过程：幅度
(b)
Phase
起振过程：相位
时间（圈数）
时间（圈数）


研究进展---伊辛哈密顿量与振荡器损耗的映射
大规模的自旋存储
Low bias
Quadrature bias
BPF
Amplifier
PD
微波二进制
相位锁定/生成
光电振荡器
可编程的自旋关联
Cavity modes
Gain Bandwidth
Cavity Transmission
Cavity losses
振荡器选模机制：最小损耗原理
给定交互矩阵J条件下系统损耗
无连接时不同组合状态下系统损耗
振荡网络损耗
最小损耗=系统基态
振荡幅度
最低损耗状态
子振荡不同振荡状态组合结构
无耦合时，各个子振荡独立，具有相同损耗。归一化之后总的损耗为N。
当子振荡之间存在耦合时，针对单个子振荡（伊辛自旋），针对第i个自旋的损耗为：
$Loss_i = 1 - \sum_{n=1, n\neq i}^{N} J_{i,n}\sigma_i\sigma_n, (\sigma_i = \pm 1)$
系统的总的损耗为：
$Loss_{system} = \sum_{i=1}^{N} Loss_i = N - \sum_{i,n}^{N} J_{i,n}\sigma_i\sigma_n, (\sigma_i = \pm 1)$
伊辛哈密顿量
12

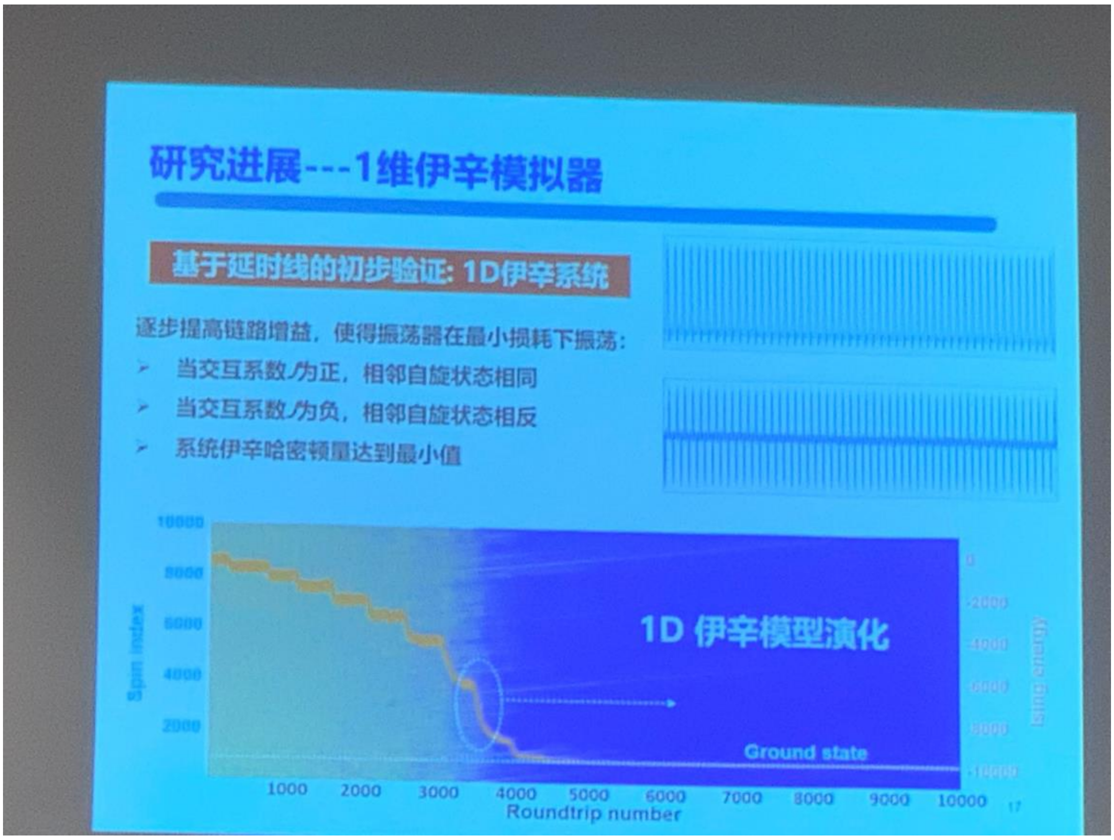

研究进展---随机二值相位产生
实验系统：延时线耦合方案，当延时量为n个脉冲周期，则第 i 个脉冲 — 第i+n 个
Multi-channel Laser
MUX
IM
Low bias
Quadrature bias
20-km DSF
DEMUX
100 MHz
Shape the CW lightsource into the optical pulse
10,000 pulses with 0/π phase
LO1: 20-GHz
BPF
Synchronized
Splitter
Amplifier
PD
Measurement
Oscilloscope
ESA
ADC
LO2: 10 GHz
Mixer
LPF
13

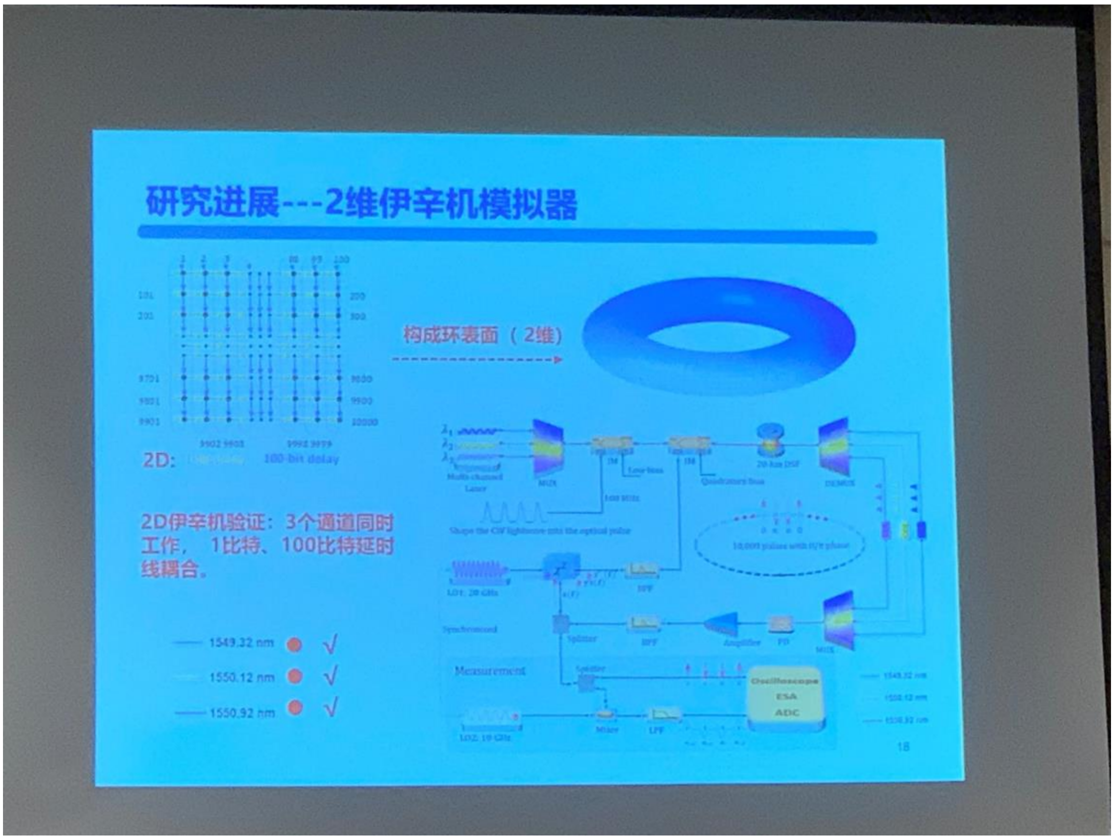


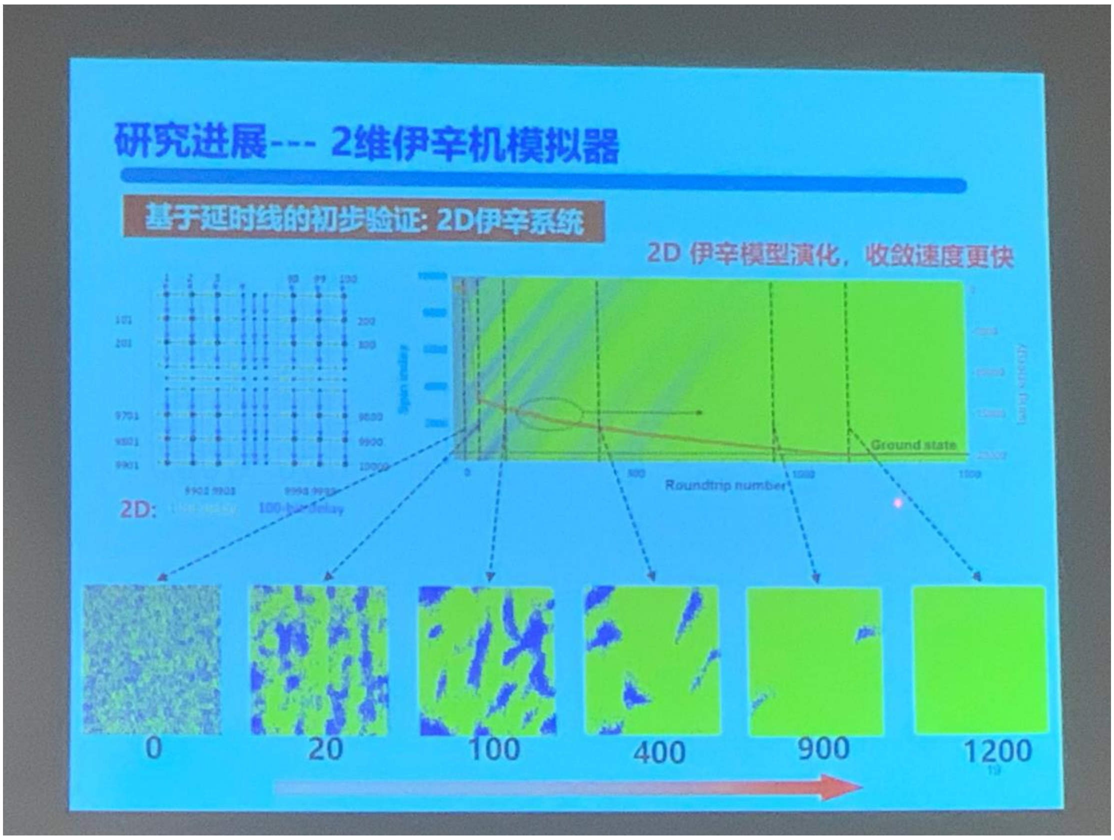
研究进展---随机二值相位产生
稳定独立振荡
振荡随机性
规模10,000
相干时间 > 30min
解调信号
10ns
振荡信号及其调制信号
10000子振荡
振荡幅度统计
30分钟眼图
自相关/互相关结果
1000次测试0/π振荡比例

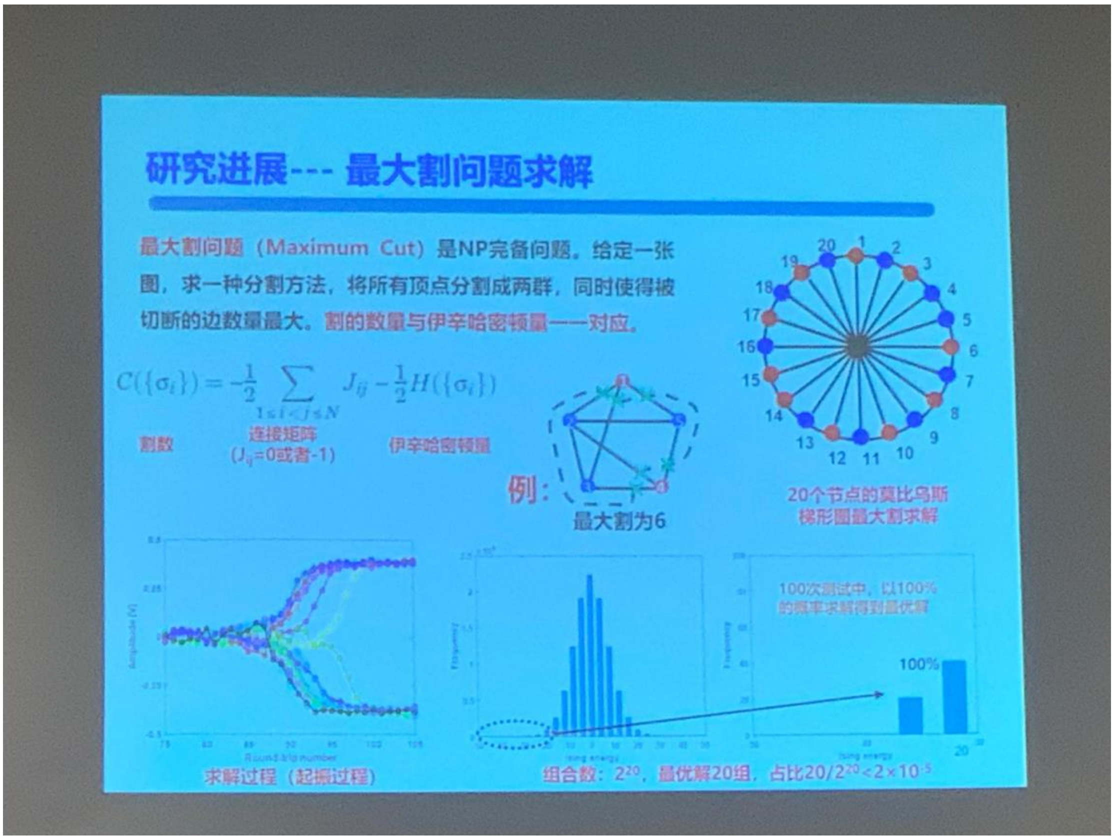


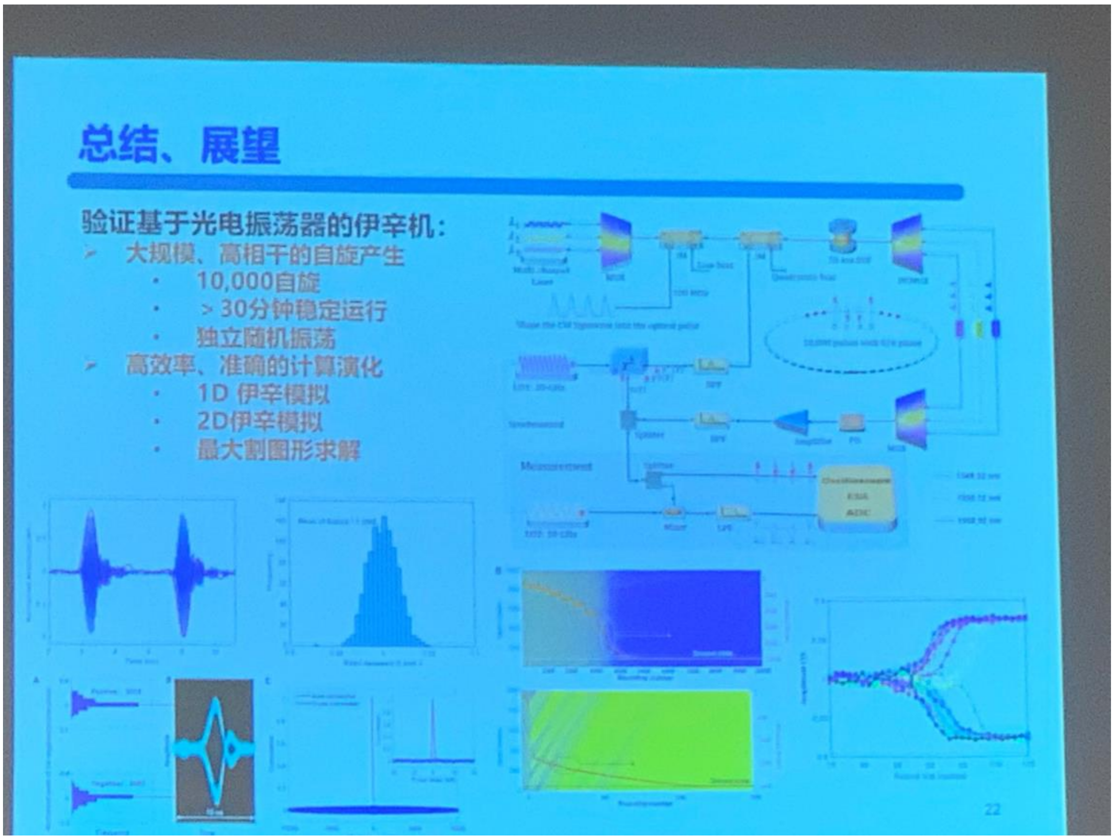
研究进展---1维伊辛机模拟器
spin 1
spin 10000
1D伊辛机验证：双通道工作，1比特（10ns）延时线耦合，相互交互的系数/通过调谐对应通道的激光器功率（幅度调谐）、以及光延时线（符号调谐）实现。
1D:
1549.32 nm
1550.12 nm
1550.92 nm
MUX
DEMUX
Measurement
Oscilloscope
ESA
ADC


研究进展---1维伊辛模拟器
基于延时线的初步验证：1D伊辛系统
逐步提高链路增益，使得振荡器在最小损耗下振荡：
当交互系数J为正，相邻自旋状态相同
当交互系数J为负，相邻自旋状态相反
系统伊辛哈密顿量达到最小值
1D 伊辛模型演化
Ground state
Spin index
Ising energy
Roundtrip number
17


研究进展---2维伊辛机模拟器
构成环表面（2维）
2D:
100-bit delay
2D伊辛机验证：3个通道同时工作，1比特、100比特延时线耦合。
1549.32 nm √
1550.12 nm √
1550.92 nm √
Measurement
Oscilloscope
ESA
ADC
18


研究进展--- 2维伊辛机模拟器
基于延时线的初步验证: 2D伊辛系统
2D 伊辛模型演化，收敛速度更快
Ground state
Roundtrip number
2D:
0
20
100
400
900
1200
19


研究进展--- 最大割问题求解
最大割问题（Maximum Cut）是NP完备问题。给定一张图，求一种分割方法，将所有顶点分割成两群，同时使得被切断的边数量最大。割的数量与伊辛哈密顿量一一对应。
$C(\{\sigma_i\}) = -\frac{1}{2}\sum_{1\le i<j\le N} J_{ij} - \frac{1}{2}H(\{\sigma_i\})$
割数
连接矩阵
(J_{ij}=0或者-1)
伊辛哈密顿量
例：
最大割为6
20个节点的莫比乌斯梯形图最大割求解
100次测试中，以100%的概率求解得到最优解
100%
求解过程（起振过程）
组合数：2^{20}，最优解20组，占比$20/2^{20}<2\times10^{-5}$


总结、展望
验证基于光电振荡器的伊辛机：
大规模、高相干的自旋产生
10,000自旋
> 30分钟稳定运行
独立随机振荡
高效率、准确的计算演化
1D 伊辛模拟
2D伊辛模拟
最大割图形求解
Measurement
ESA
ADC
22