



# 赵忠尧博士后申请报告

---

董超，加速器中心

合作导师：秦庆

中国科学院高能物理研究所

[dongchao@ihep.ac.cn](mailto:dongchao@ihep.ac.cn)



# 目录

---

1. 个人简历
2. 超导腔的掺氮研究（样片测试和超导腔实验）
  - (1) 样片测试（SIMS、SEM、RT、MT、 $\Delta$ ）
  - (2) 超导腔实验
3. 铁基超导材料研究（物理所金魁老师合作）
  - (1) 研究目的
  - (2) 研究基础
  - (3) 已有成果
4. 设备搭建
5. 未来工作计划



# 个人简历

- 2008 – 2012: 河北师范大学物理学院, 理论物理学, 获得学士学位;
- 2012 – 2017: 南开大学物理科学学院, 粒子物理与原子核物理专业, 获得博士学位;
- 2013 – 2016: 中科院高能物理研究所联合培养, 开始从事BESIII实验数据分析工作, 主要的题目是 $e^+e^- \rightarrow \eta' J/\psi$  (*Phys. Rev. D* **94**, 032009 (2016)) 和  $e^+e^- \rightarrow \eta\psi'$ ; 最后一年参与了加速器中心高频组的工作, 主要是超导腔的氮掺杂。
- 2017.07 – present: 中科院高能物理研究所加速器中心, 博士后。主要研究方向是超导腔的氮掺杂及其机理研究 (专利 No.201711479415.1)、寻找具有应用价值的铁基超导材料 (arXiv:1706.0689)。

## 参与项目:

1. CEPC加速器物理及关键技术研究, 高能所创新项目, 650万元, 2015.1~2018.12, 负责人: 秦庆。
2. 高能环形正负电子对撞机相关的物理和关键技术预研究, 国家重点研发计划, 2016YFA0400400, 3600万, 2016.7~2021.7, 负责人: 高原宁。
3. 超导腔的掺氮技术研究, 国家自然科学基金青年基金项目, 11505197, 27.6万元, 2016.1-2018.12, 负责人: 沙鹏。

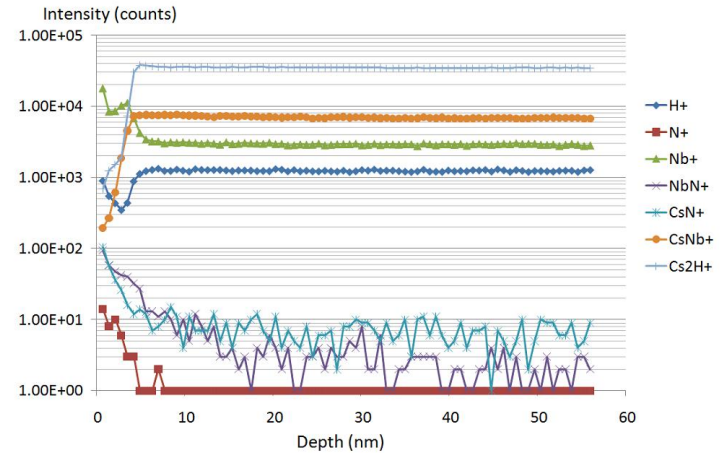
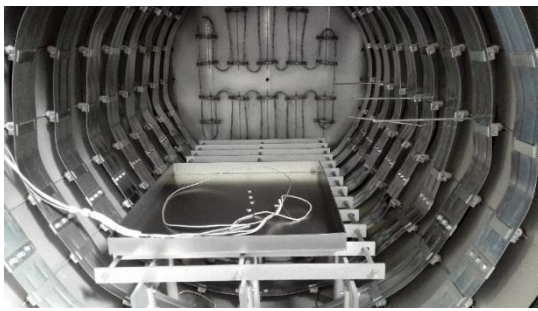


# 目录

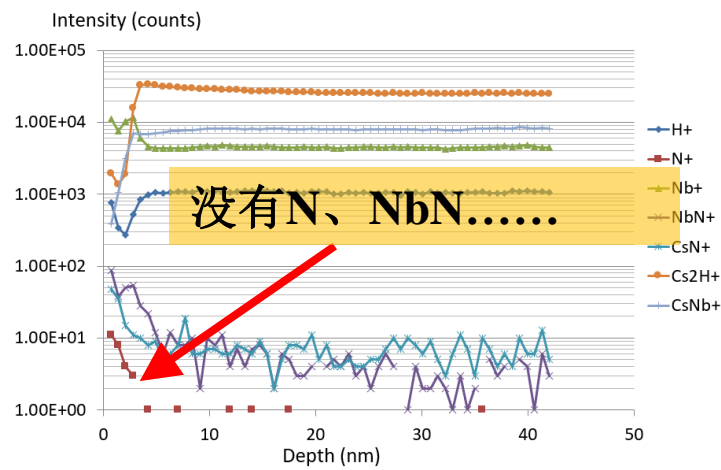
---

1. 个人简历
  2. 超导腔的掺氮研究（样片测试和超导腔实验）
    - (1) 样片测试（SIMS、SEM、RT、MT、 $\Delta$ ）
    - (2) 超导腔实验
  3. 铁基超导材料研究（物理所金魁老师合作）
    - (1) 研究目的
    - (2) 研究基础
    - (3) 已有成果
  4. 设备搭建
  5. 未来工作计划
-

# 掺氮样片SIMS——高能所真空炉



掺氮前



掺氮后

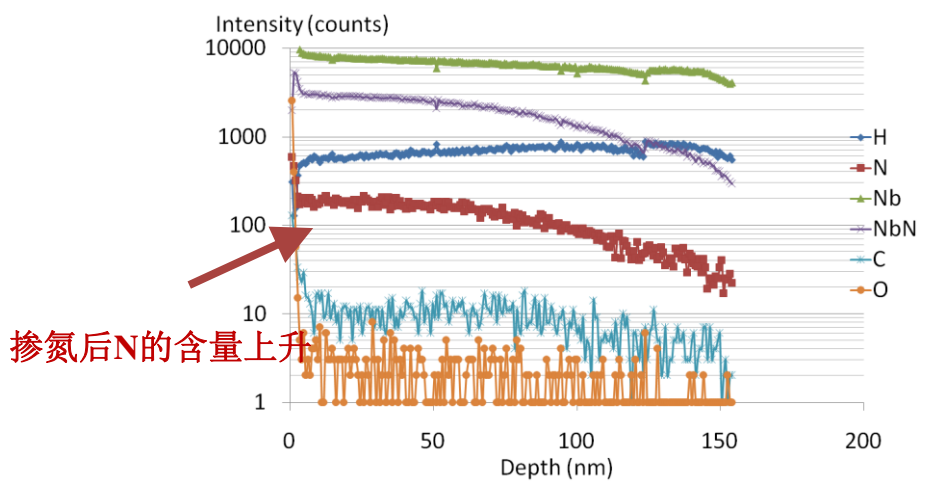
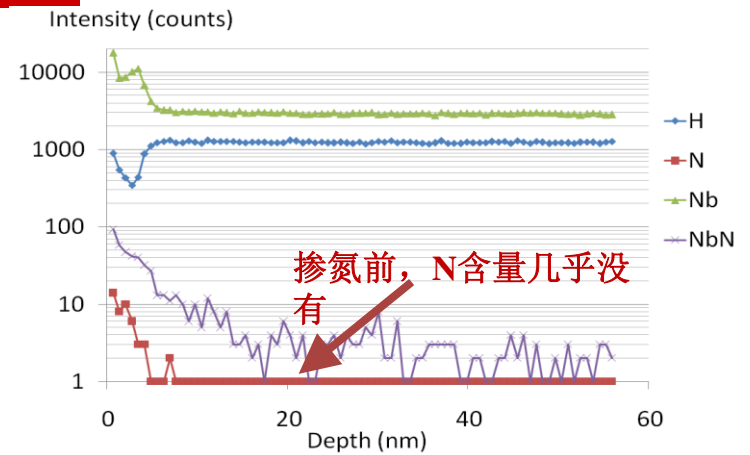




# 掺氮样片SIMS——OTIC

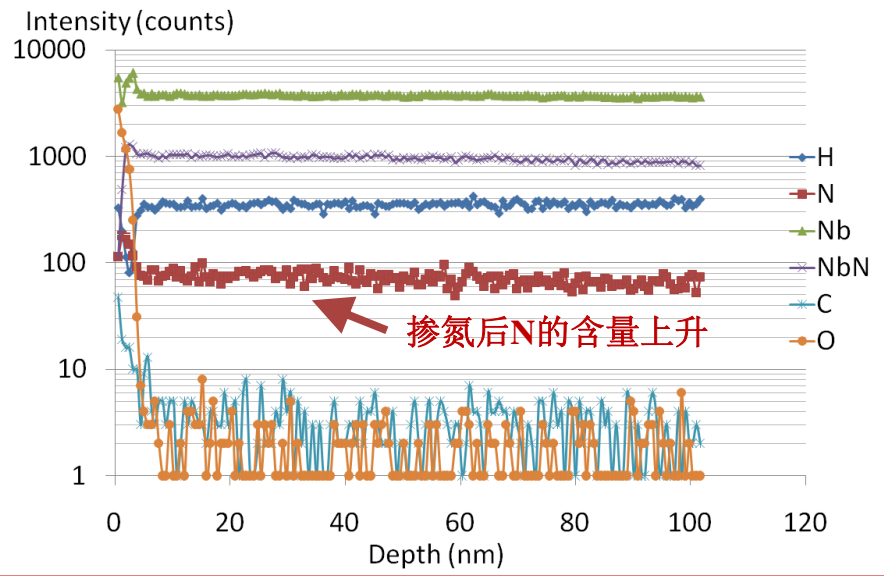
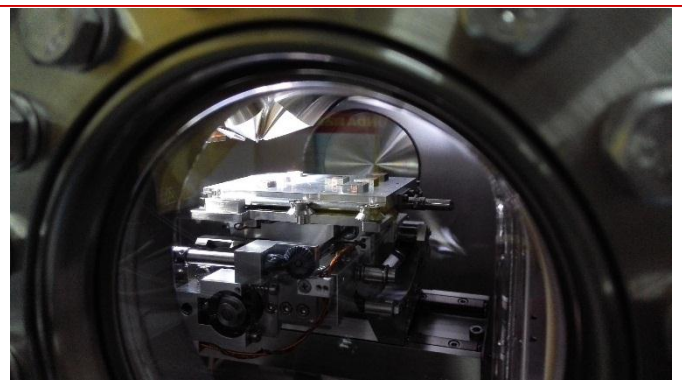
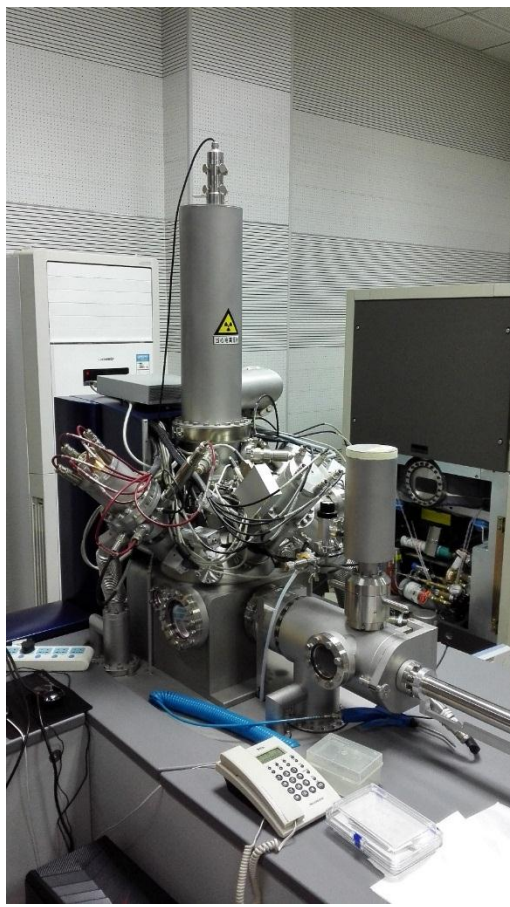


Oil-free pumping system: two COOLVAC10000 iCL cryo-pumps by Leybold、one roots pump (1200L/S)、one screw pump.





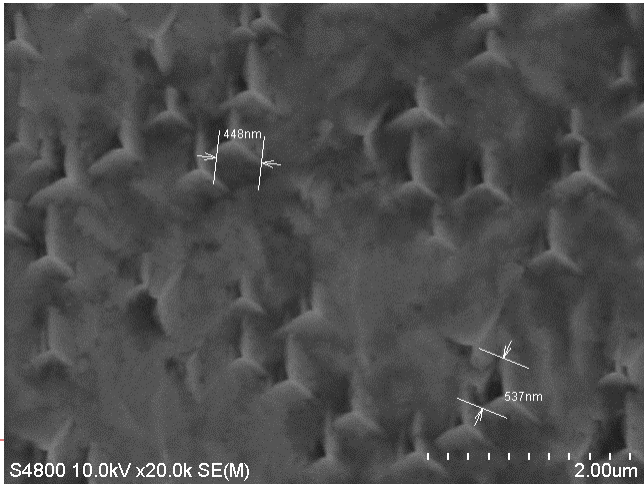
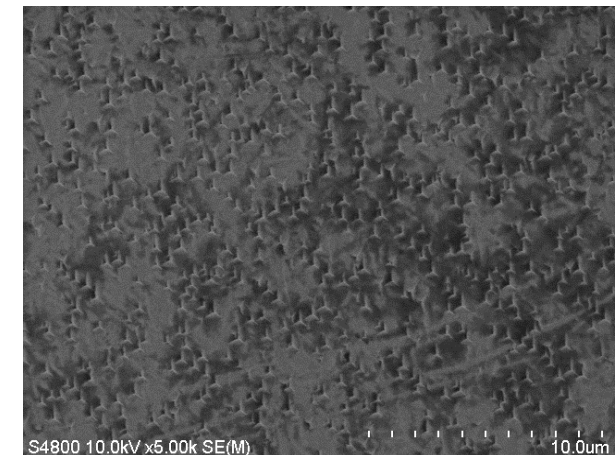
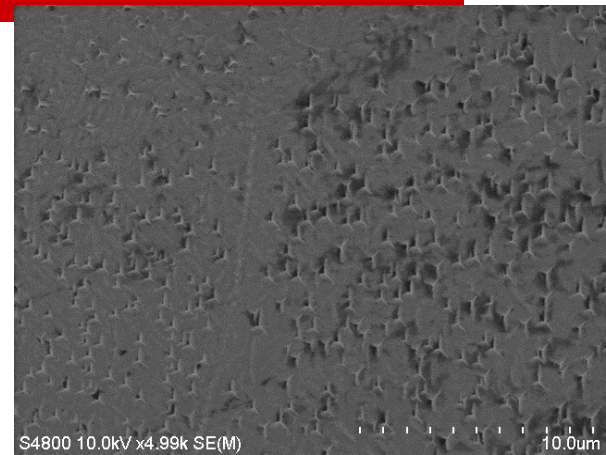
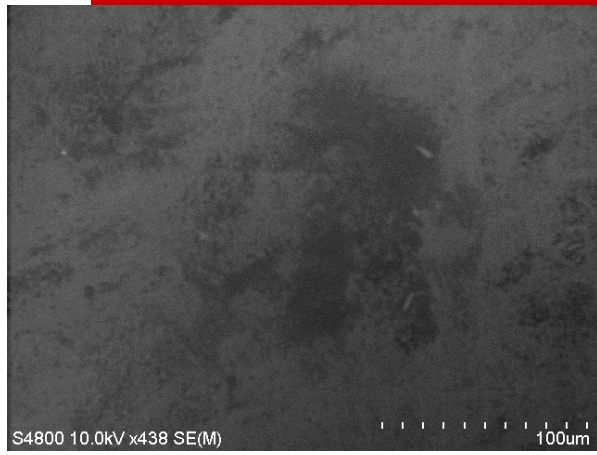
# 掺氮样片SIMS——KEK/J-PARC







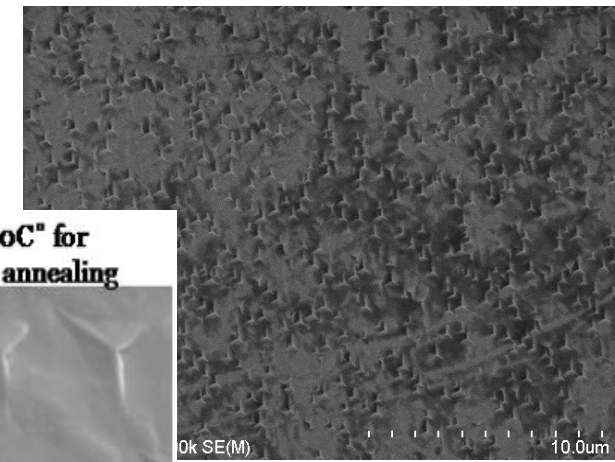
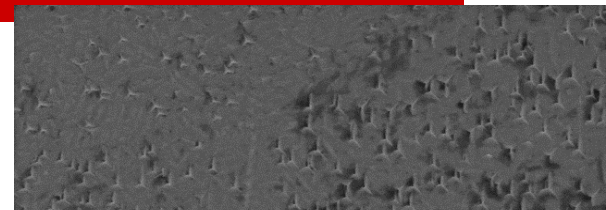
# 掺氮样片SEM





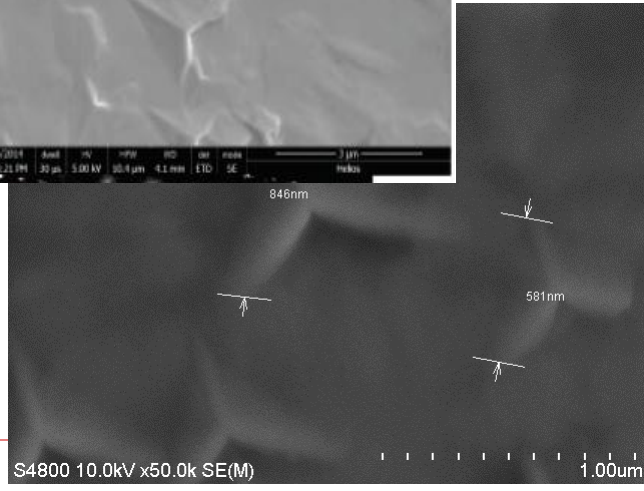
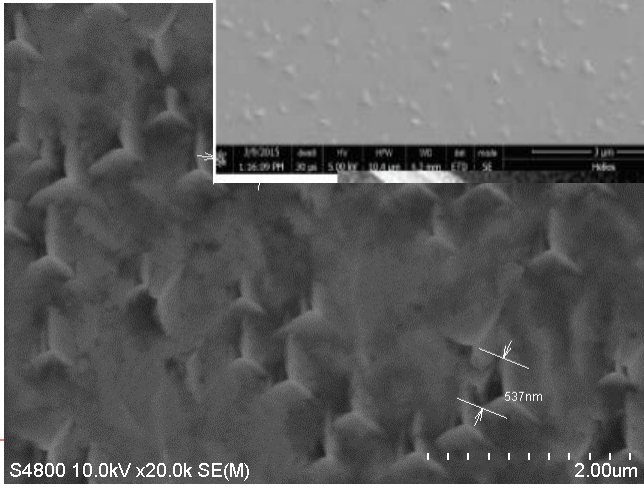
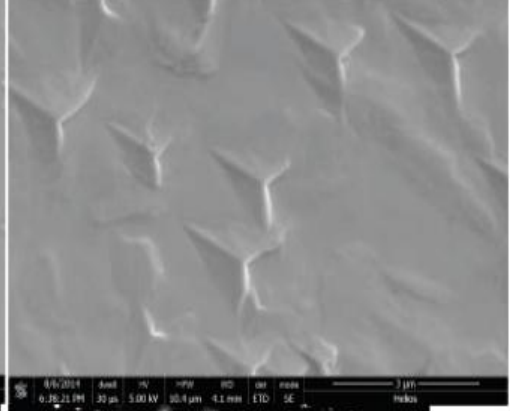
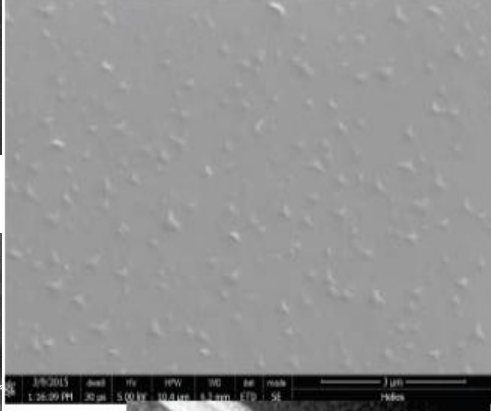


# 掺氮样品SEM



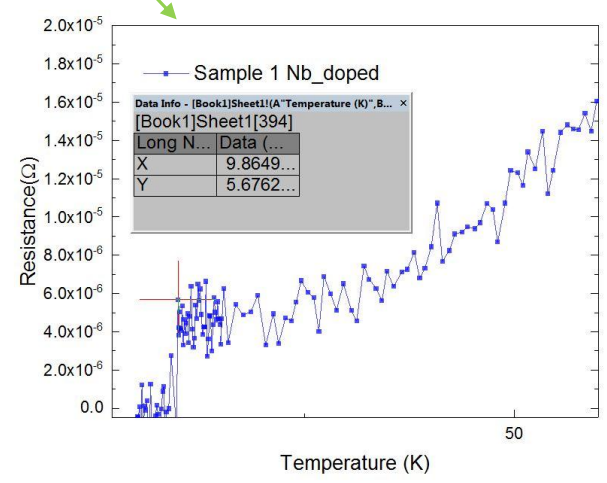
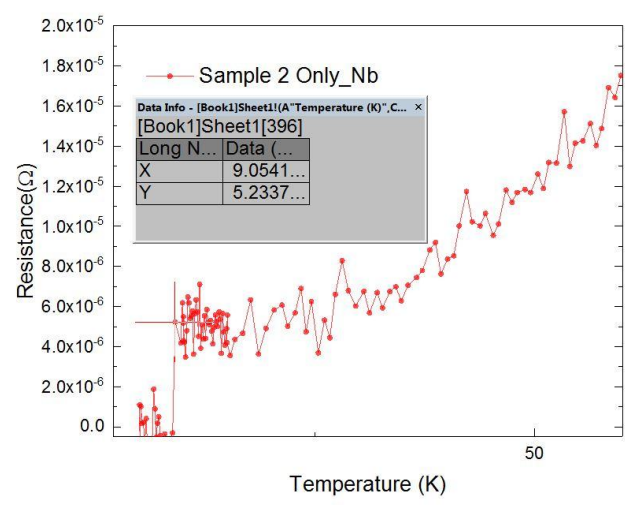
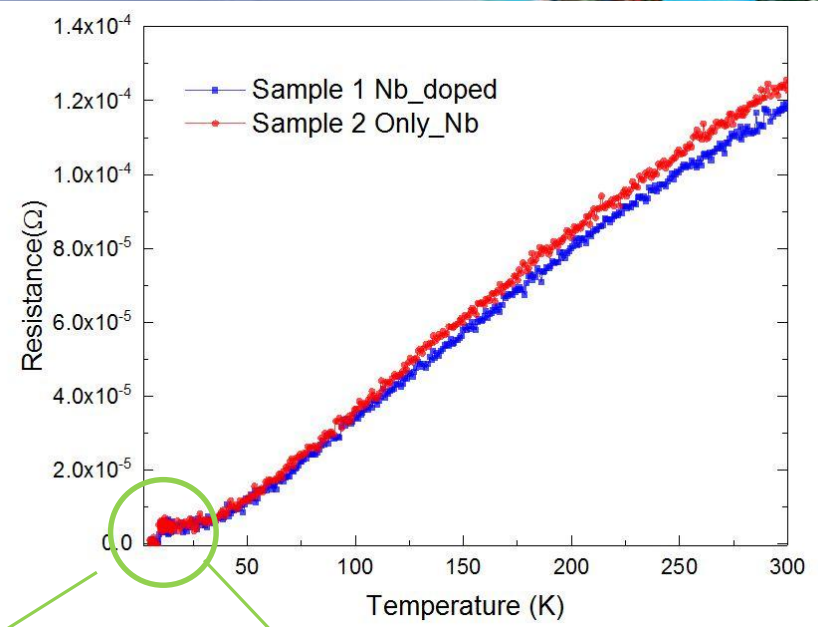
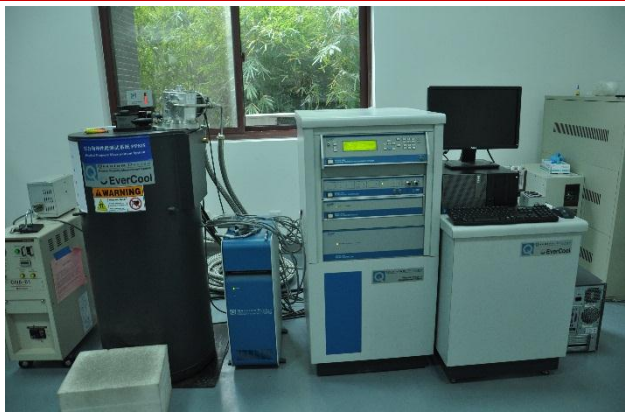
**Flat Nb sample baked at 800C" for 2 min with N<sub>2</sub> + 6 min annealing**

**Flat Nb sample baked at 800C" for 20 min with N<sub>2</sub> + 30 min annealing**





# 掺氮样片RT



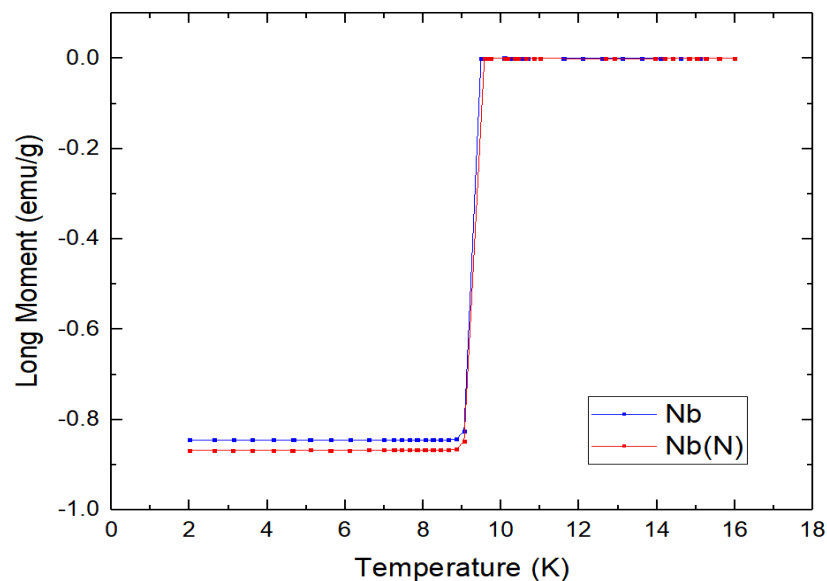


## 掺氮样片MT

交流磁化率： $\chi = \chi' + i\chi''$

实部：反映  
样品磁特性

虚部：反映样品在  
交变磁化过程中的  
能量损耗。



使用MPMS分别测试了纯Nb样片和掺氮样片的质量归一磁矩的温度变化。

材料参数：Nb片（0.6828g）；掺氮样片（0.7060g）。

测试参数：磁场强度-50 Oe；磁场方向-垂直膜面。



# 目录

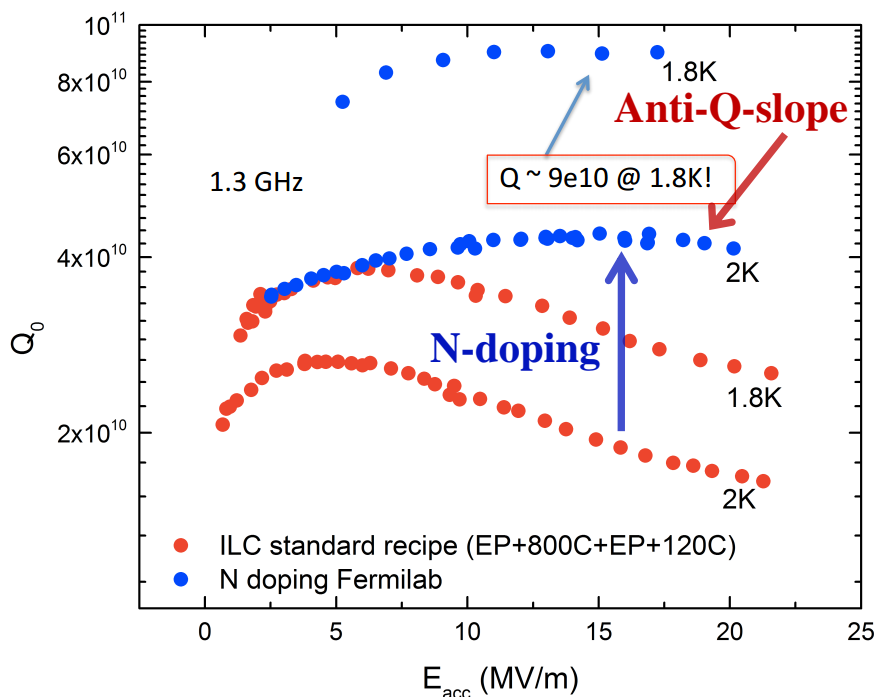
---

1. 个人简历
2. 超导腔的掺氮研究（样片测试和超导腔实验）
  - (1) 样片测试（SIMS、SEM、RT、MT、 $\Delta$ ）
  - (2) 超导腔实验
3. 铁基超导材料研究（物理所金魁老师合作）
  - (1) 研究目的
  - (2) 研究基础
  - (3) 已有成果
4. 设备搭建
5. 未来工作计划

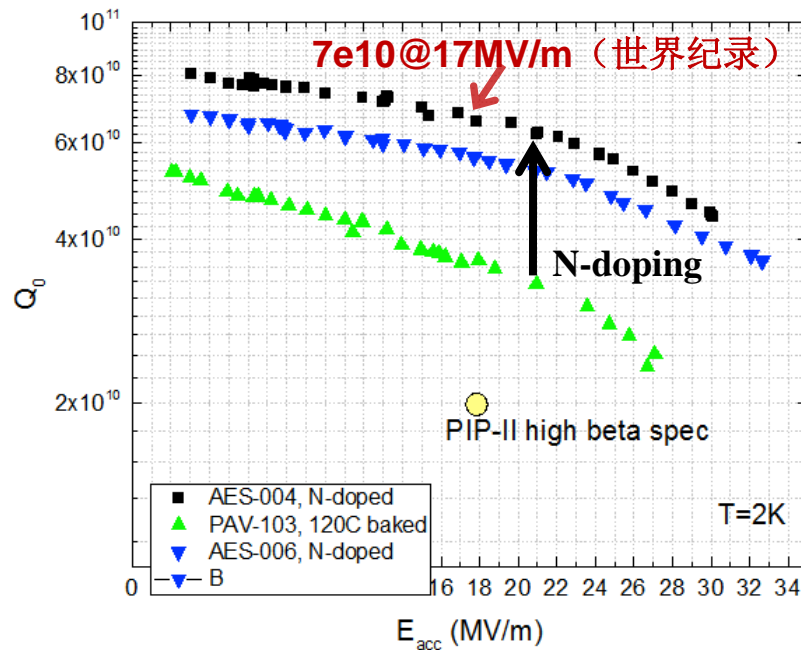


# 超导腔掺氮 (N-doping) 研究

- 掺氮可以大幅降低铌的BCS电阻，从而降低超导腔的损耗（节省低温系统的造价和运行费用）、提高Q值。以1.3GHz超导腔为例，掺氮将腔的损耗降低1/2~2/3、Q值提高1~2倍。
- 2012年，美国费米实验室首先发现，并被LCLS-II加速器采用（仍在改进中）。
- 日本KEK刚刚取得初步成功（Q值略有提高）；欧洲还未成功（Q值未见提高）。



1.3 GHz 超导腔测试结果 (FNAL)

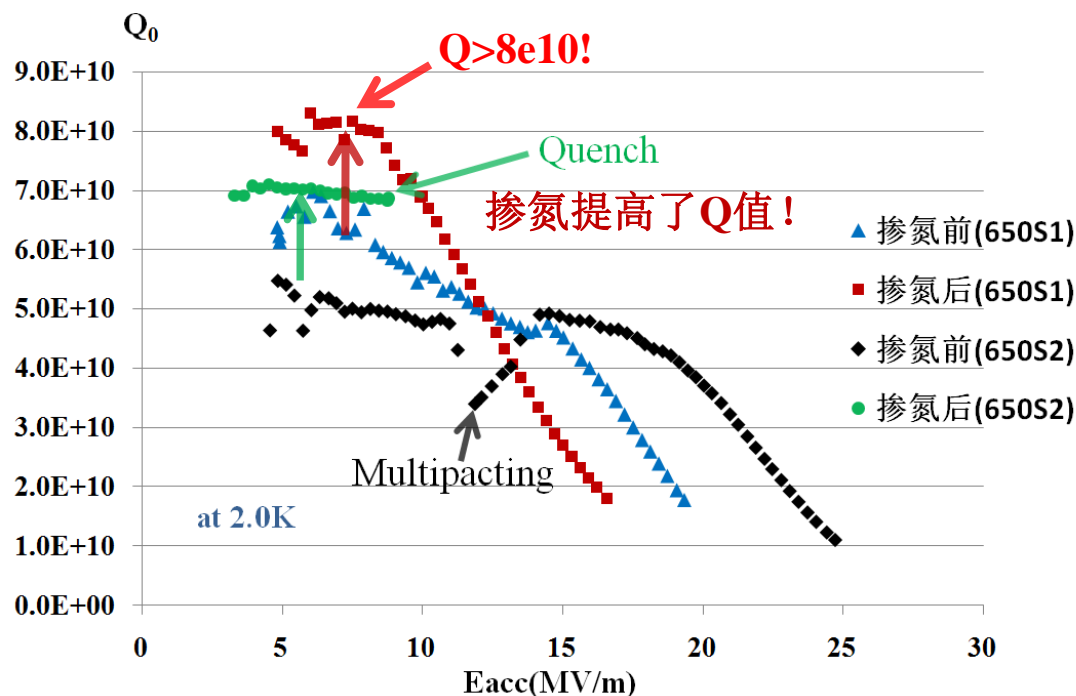


PIP-II 650MHz超导腔测试结果 (FNAL)



## 650MHz 单cell腔掺氮垂测结果

- 掺氮后，两只超导腔（650S1、650S2）的Q值均明显上升——国内首次明确观察到掺氮对超导腔（细晶粒）Q值的提升现象，同时创造了国内超导腔Q值( $\sim 7e10$ )的最高记录！
  - 650S1:  $Q_0=7e10@E_{acc}=10MV/m$ 。
  - 650S2: Quench at  $Q_0=6.9e10@E_{acc}=8.8MV/m$ 。



**Highlight of CEPC in 2017**

**掺氮without电抛光  
——国际首例!**



# 目录

---

1. 个人简历
2. 超导腔的掺氮研究（样片测试和超导腔实验）
  - (1) 样片测试（SIMS、SEM、RT、MT、 $\Delta$ ）
  - (2) 超导腔实验
3. 铁基超导材料研究（物理所金魁老师合作）
  - (1) 研究目的
  - (2) 研究基础
  - (3) 已有成果
4. 设备搭建
5. 未来工作计划



# 研究目的

## Path to 70-120-200 MV/m

- **Dirty Nb layer on Nb:**

$$H_c = 200 \text{ mT}, \quad H_s = 170 \text{ mT}, \quad l = 2 \text{ nm}, \quad \text{and} \quad \lambda = \lambda(\xi_0/l)^{1/2} = 180 \text{ nm}$$

$$H_m = 288 \text{ mT}, \quad E_{\text{acc}} = 70 \text{ MV/m}, \quad d_m = 0.44\lambda = 79 \text{ nm}.$$

20% gain as compared to  $H_s = 240 \text{ mT}$  of clean Nb

- **Nb<sub>3</sub>Sn on Nb:**  $H_s = 0.84H_c = 454 \text{ mT}$  and  $\lambda = 120 \text{ nm}$  (moderately dirty):

$$H_m = 507 \text{ mT}, \quad E_{\text{acc}} = 120 \text{ MV/m}, \quad d_m = 1.1\lambda = 132 \text{ nm}$$

doubles the superheating field of clean Nb

- **Fe-pnictides on Nb:**  $H_s = 0.84H_c = 840 \text{ mT}$  and  $\lambda = 200 \text{ nm}$ :

$$H_m = 872 \text{ mT}, \quad E_{\text{acc}} = 206 \text{ MV/m}, \quad d_m = 1.78\lambda = 356 \text{ nm}$$

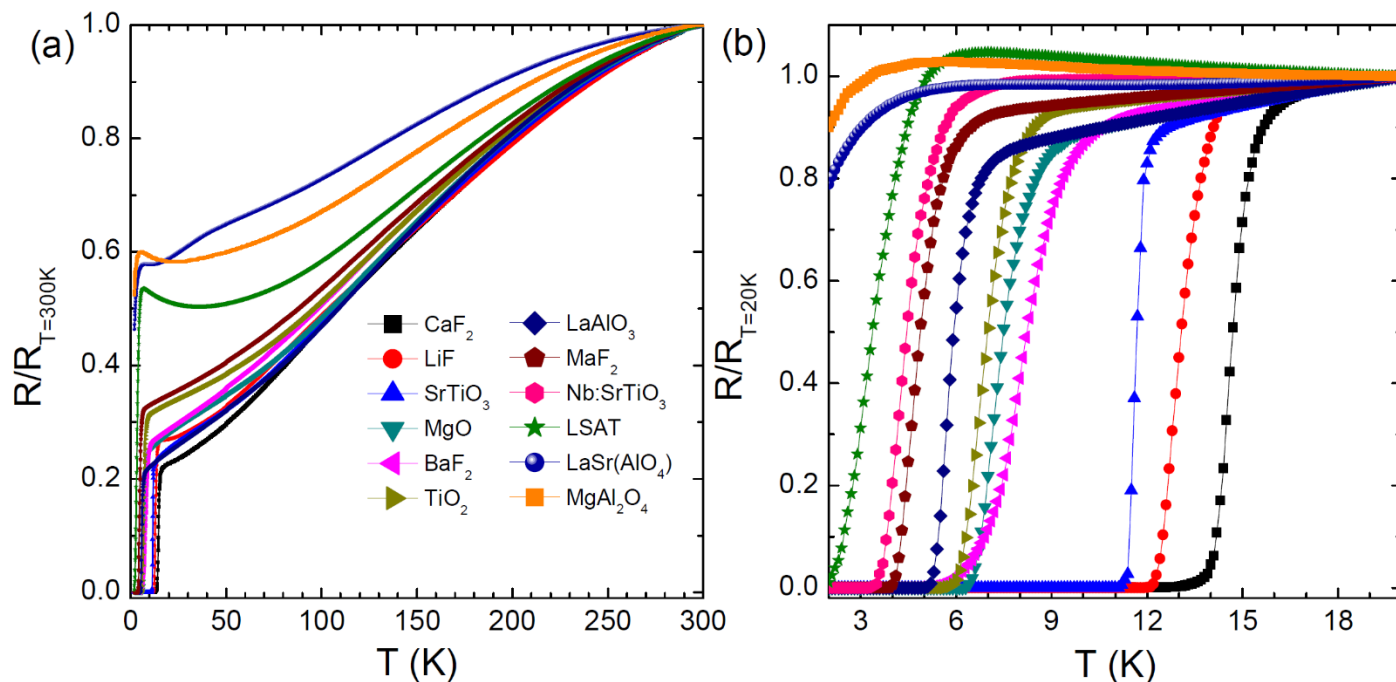
quadruples the superheating field of clean Nb





## 研究基础

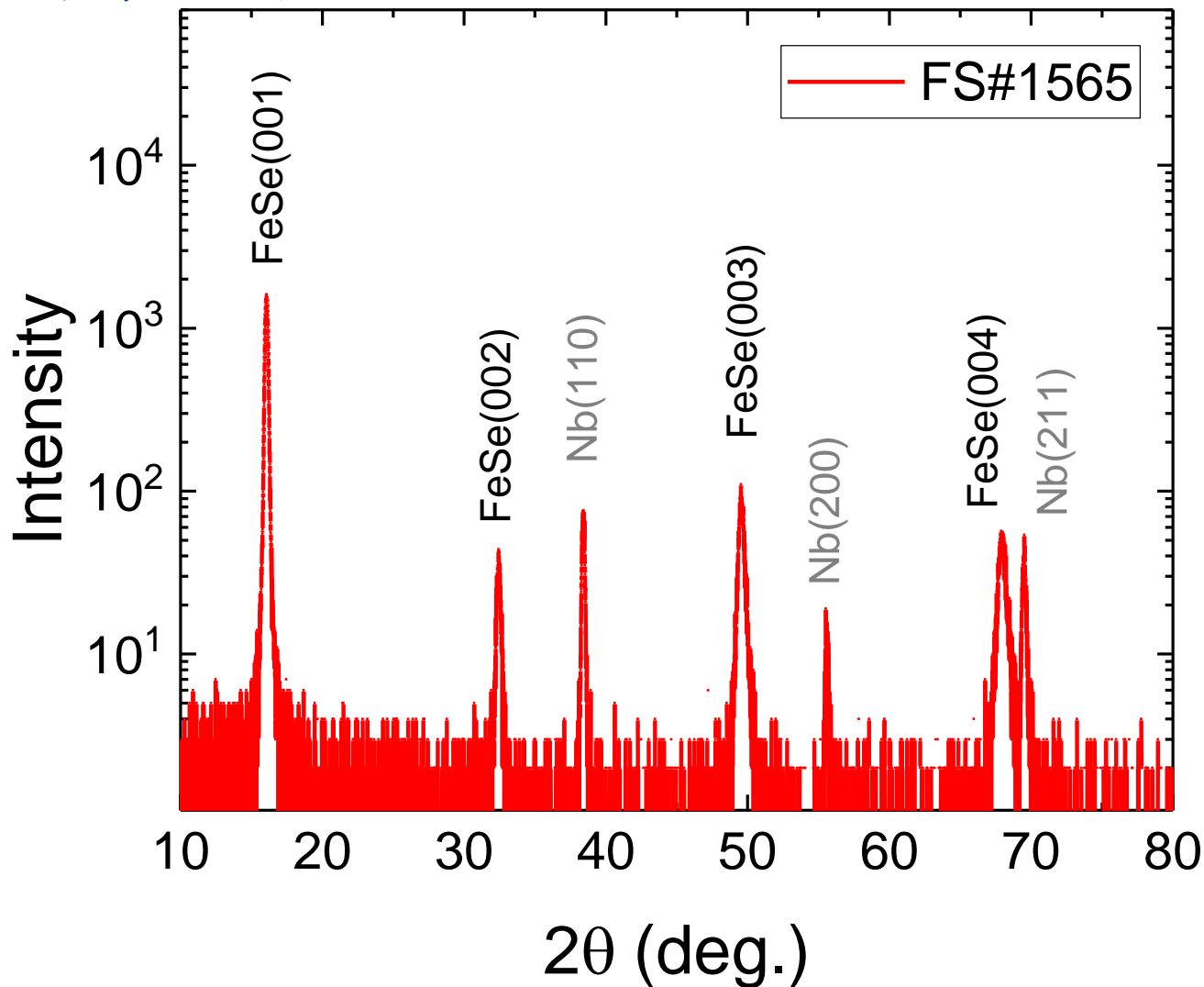
1. 十二种衬底的高质量FeSe超导薄膜
2.  $> 160 \text{ nm}$  ,  $T_{c0}$ 与衬底外延应力并无明显关系



$\text{CaF}_2$  ,  $\text{LiF}$ 和 $\text{SrTiO}_3$ 衬底的FeSe薄膜均具有高于块材的  $T_c$



## 研究进展



真空沉积  
 $T_s = 350\text{ }^\circ\text{C}$   
4 Hz 350 mJ  
60 min

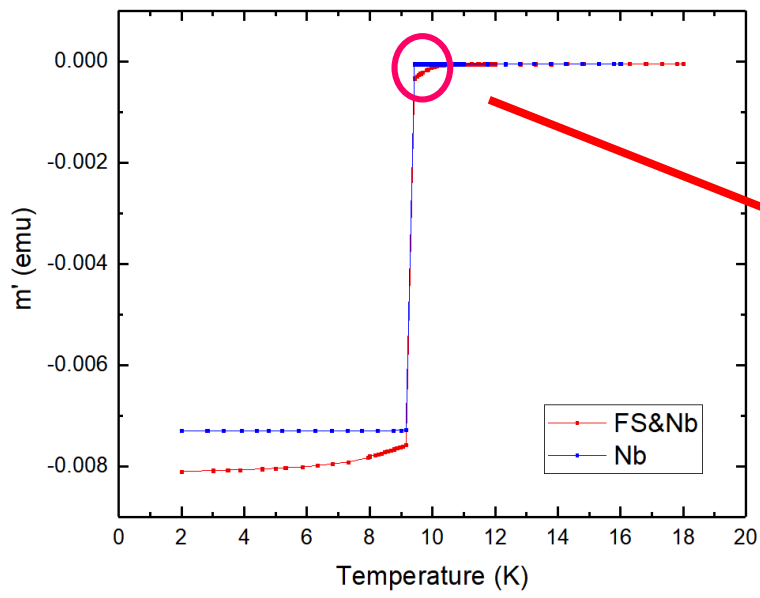
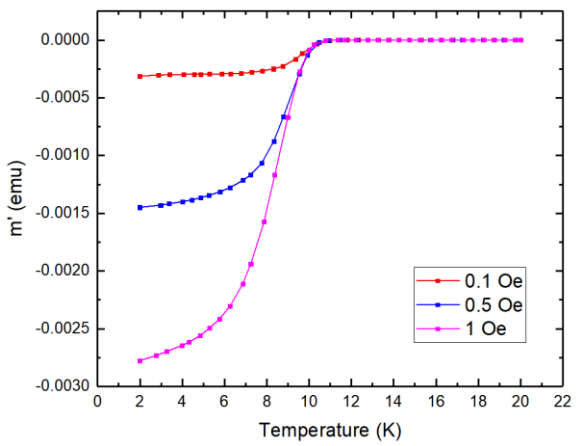
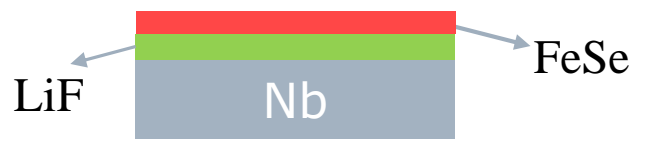
无退火操作

结果可重复

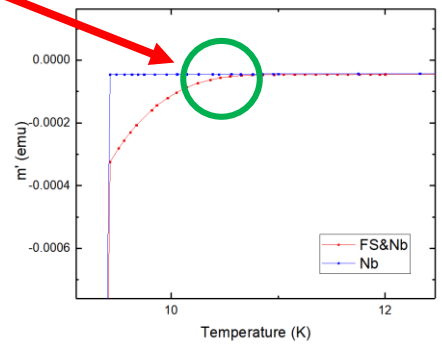


# 通过测量MT确定在Nb衬底上生长的FeSe薄膜的Tc

材料: FeSe/LiF,  $T_{c0} = 11K$   
 内容: 摸索交流测试参数  
 DC = 0 Oe  
 AC = 0.1, 0.5, 1 Oe/ 133Hz



可以看到类似  
与单纯铁硒薄  
膜11K转变效果  
的叠加



结论: 1Oe, 133Hz较佳



# 目录

---

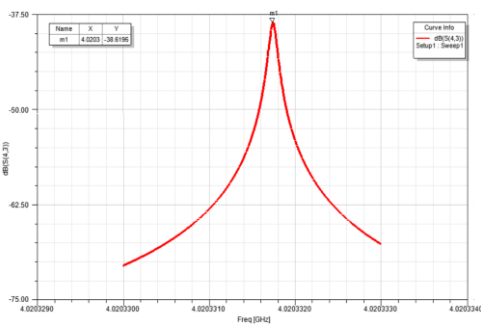
1. 个人简历
2. 超导腔的掺氮研究（样片测试和超导腔实验）
  - (1) 样片测试（SIMS、SEM、RT、MT、 $\Delta$ ）
  - (2) 超导腔实验
3. 铁基超导材料研究（物理所金魁老师合作）
  - (1) 研究目的
  - (2) 研究基础
  - (3) 已有成果
4. 设备搭建
5. 未来工作计划



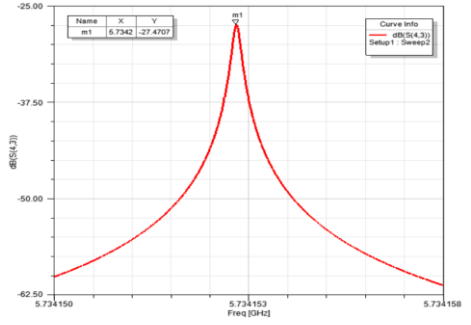
# 超导薄膜射频场下表面电阻测量设备——填充蓝宝石的圆波导腔

工作频率：4GHz 和 5.7GHz  
 工作模式：TE<sub>011</sub> 和 TE<sub>013</sub>  
 铌腔（Rs: 5000nΩ@4GHz, 4.2K）  
 Q值：4.58e6(TE<sub>011</sub>) 5.35e6(TE<sub>013</sub>)

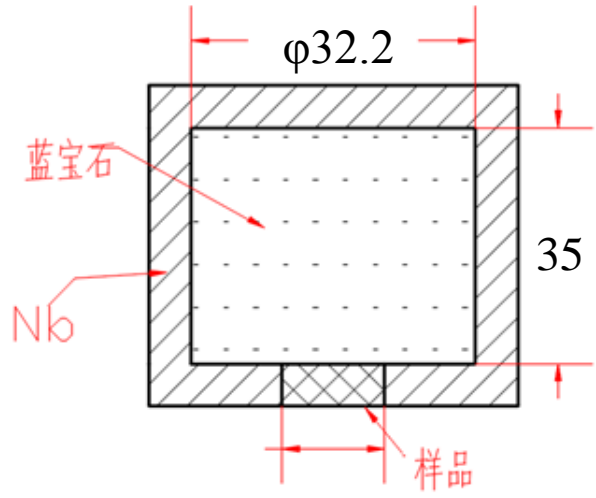
## 仿真模型



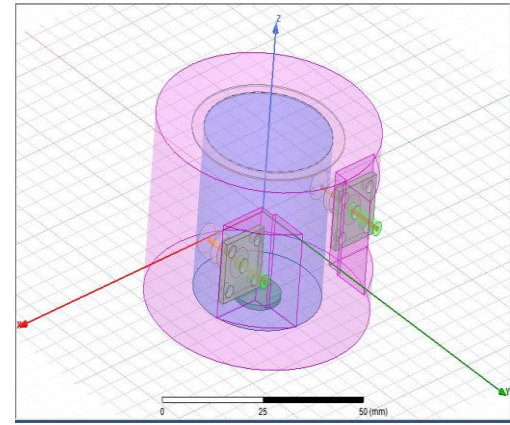
TE011频率响应曲线



TE013频率响应曲线

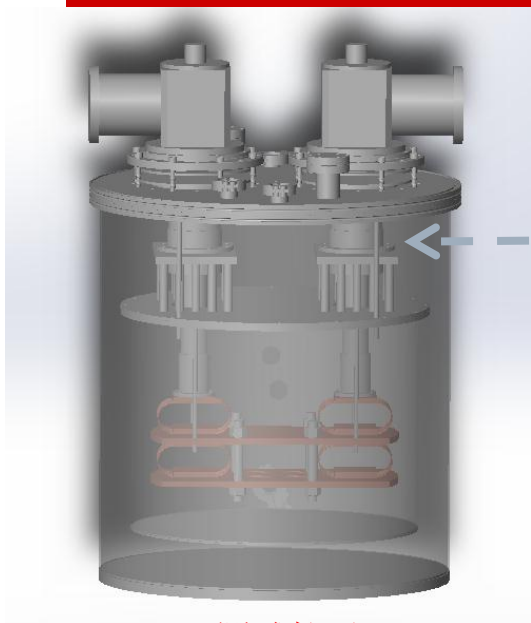


结构示意图





## 超导薄膜表面电阻测量设备低温系统（搭建中）



测试杜瓦



GM低温制冷机



分子泵机组

- 测试杜瓦：初步工程设计已经完成，正在进行工艺设计，**4.2K制冷量3W**，可稳定保持，振动小于 $\pm 10\mu\text{m}$ ，每次可同时测量4个样品。
- GM低温制冷机：型号KDE415SA，**35W@50K**，**1.5W@4.2K**（先买一台，后续再追加一台），中船重工鹏力（南京）超低温有限公司，两周后到货。



## 超导腔的表面电阻 $R_s$ 构成

$$R_s(T) = A \times \frac{\omega^2}{T} \times \exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right) + R_{\text{res}}$$

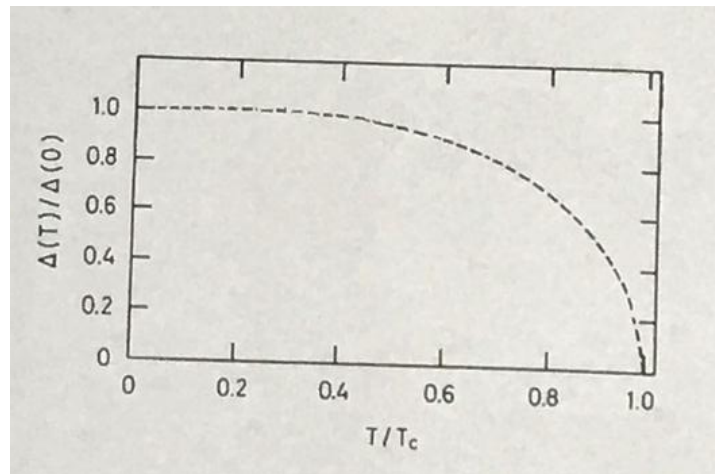
$$R_{BCS(T)}$$

$$R_{\text{res}} \equiv \lim_{T \rightarrow 0} R_s(T)$$

取决于超导材料的表面状况、环境磁场屏蔽等，**0~10n Ω**。

如果  $T < T_c/2$

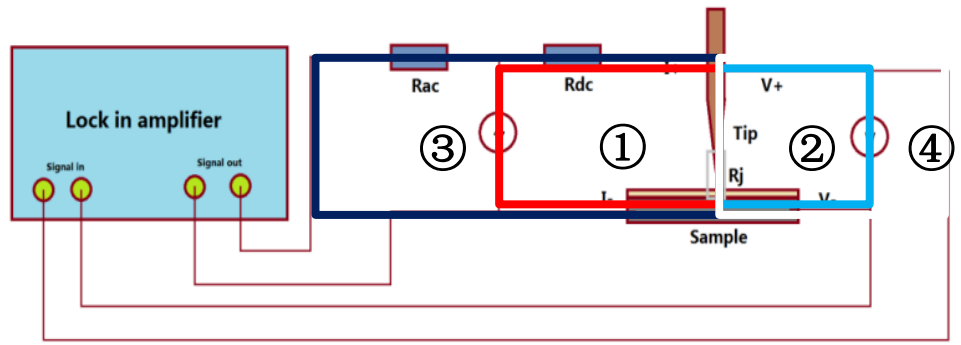
则  $\Delta(T) = \Delta(0)$



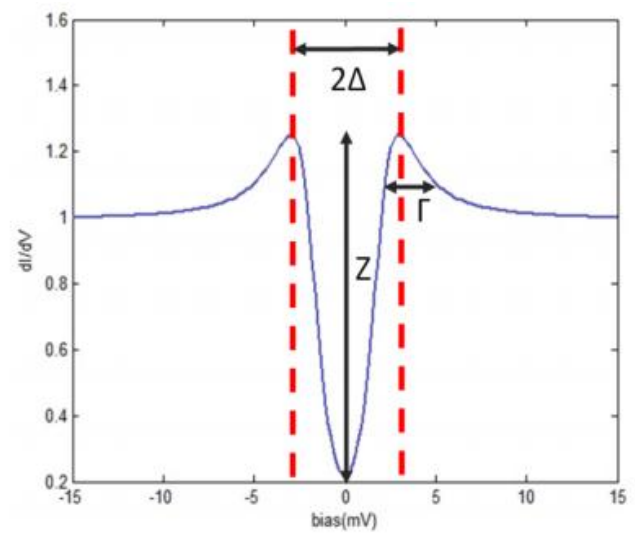
$A$ 是一个反映超导体性能的常数，与伦敦穿透深度、相干长度、费米速度、平均自由程等参数有关， $2\Delta$ 是超导体的能量间隙。



## 点接触隧道谱实验设备——测量超导材料能隙



- ①恒流源提供隧道电流I
- ②四线法用电压表测结电阻两端电压，即偏压V
- ③输出一个小交流电流 $\Delta I$ ，叠加在①号回路
- ④测得响应的交流电压 $\Delta V$



$$\frac{dI}{dV} \propto (1+Z^2) \int_{-\infty}^{+\infty} [1+A(\varepsilon)-B(\varepsilon)] \frac{\partial[f(\varepsilon+eV)-f(\varepsilon)]}{\partial V} d\varepsilon$$

$$\begin{cases} A(\varepsilon) = \frac{u_0^2 v_0^2}{\gamma^2} \\ B(\varepsilon) = \frac{(u_0^2 - v_0^2)^2 Z^2 (1+Z^2)}{\gamma^2} \end{cases} \quad \begin{cases} u_0^2 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sqrt{\varepsilon^2 - \Delta^2}}{\varepsilon} \right) \\ v_0^2 = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\sqrt{\varepsilon^2 - \Delta^2}}{\varepsilon} \right) \end{cases}$$

通过调节参数  $\Delta$ ,  $\Gamma$ ,  $Z$ , 计算不同条件下的微分电导曲线便可以对实验数据进行拟合。三个参数分别控制微分电导曲线的形状如图





# 目录

---

1. 个人简历
2. 超导腔的掺氮研究（样片测试和超导腔实验）
  - (1) 样片测试（SIMS、SEM、RT、MT、 $\Delta$ ）
  - (2) 超导腔实验
3. 铁基超导材料研究（物理所金魁老师合作）
  - (1) 研究目的
  - (2) 研究基础
  - (3) 已有成果
4. 设备搭建
5. 未来工作计划



# 未来工作计划

---

1. 与KEK合作，争取N-doping质量提高，能满足CEPC的要求，同时研究N-infusion；
2. 从磁性和能隙入手研究N-doping机理，如果磁力显微镜可用，争取得到穿透深度绝对值；
3. 完成测量射频表面电阻设备的搭建和调试，这套设备是国内第一台能测量液氦温区射频场下实验室级别小样片的设备，测量的数据非常有价值；
4. 继续优化铁基镀膜参数，提高 $T_c$ 。



---

**Thanks for your attention!**

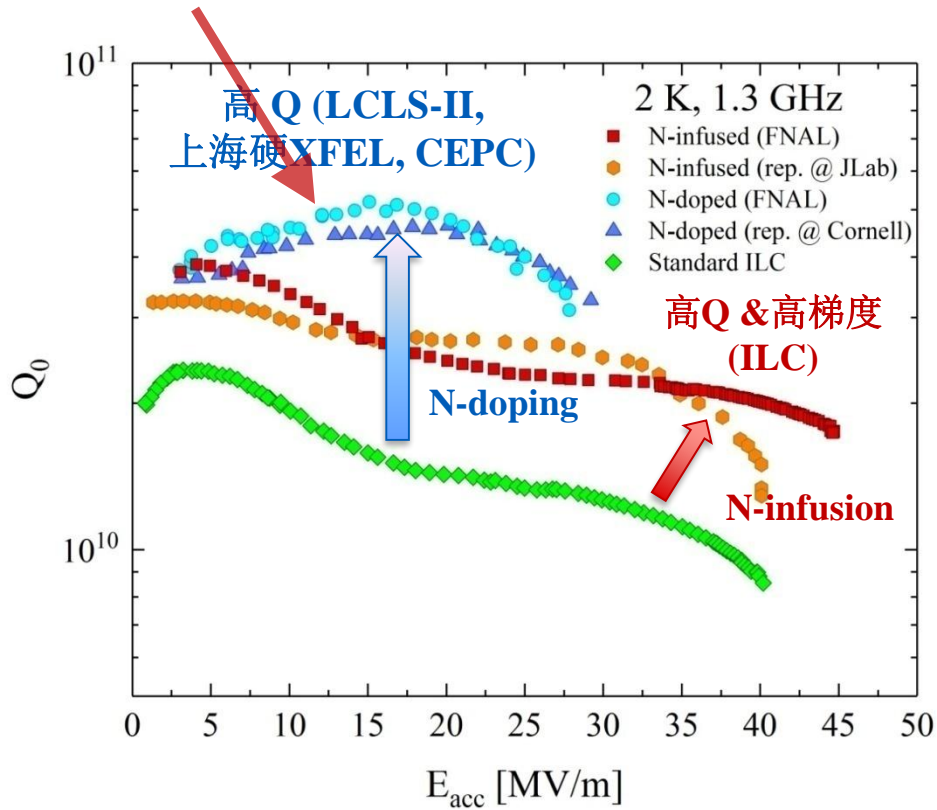


---

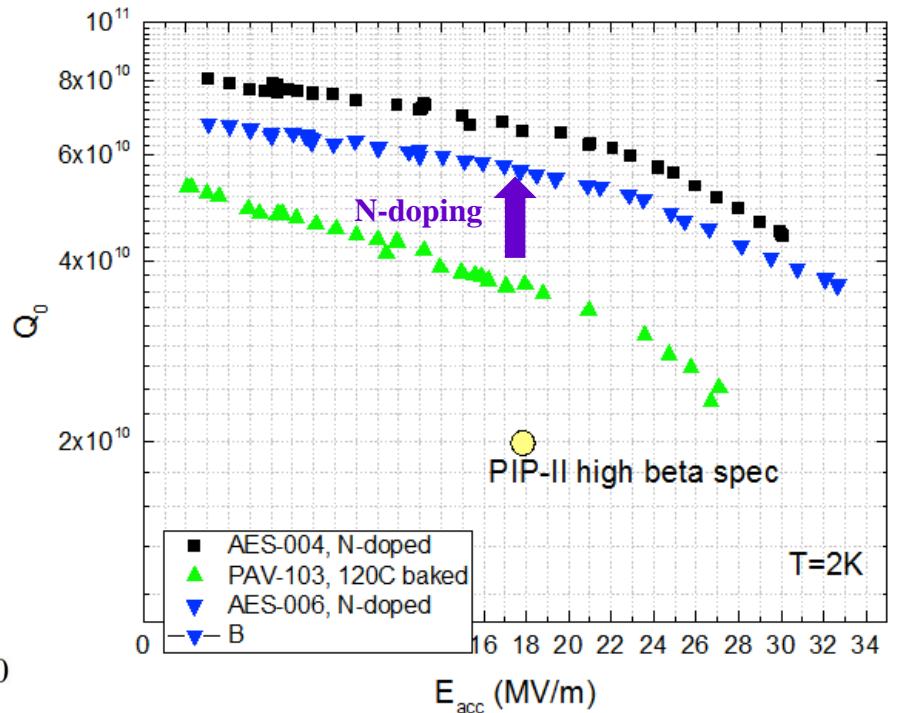
# Backup

# 掺氮对超导腔Q值的提升

## Anti Q-slope



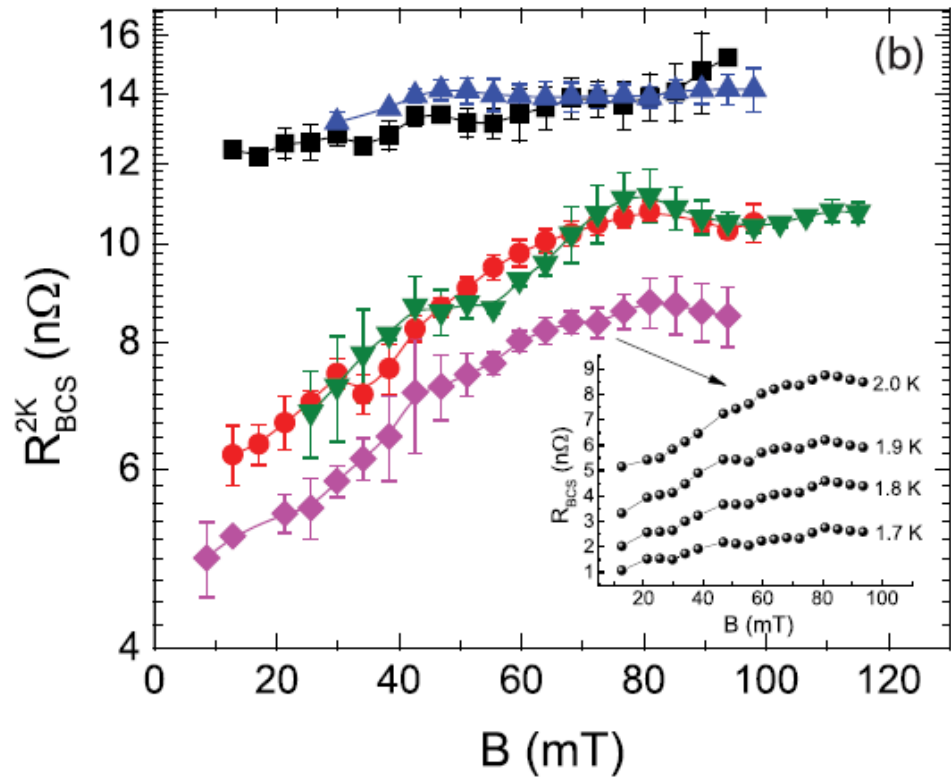
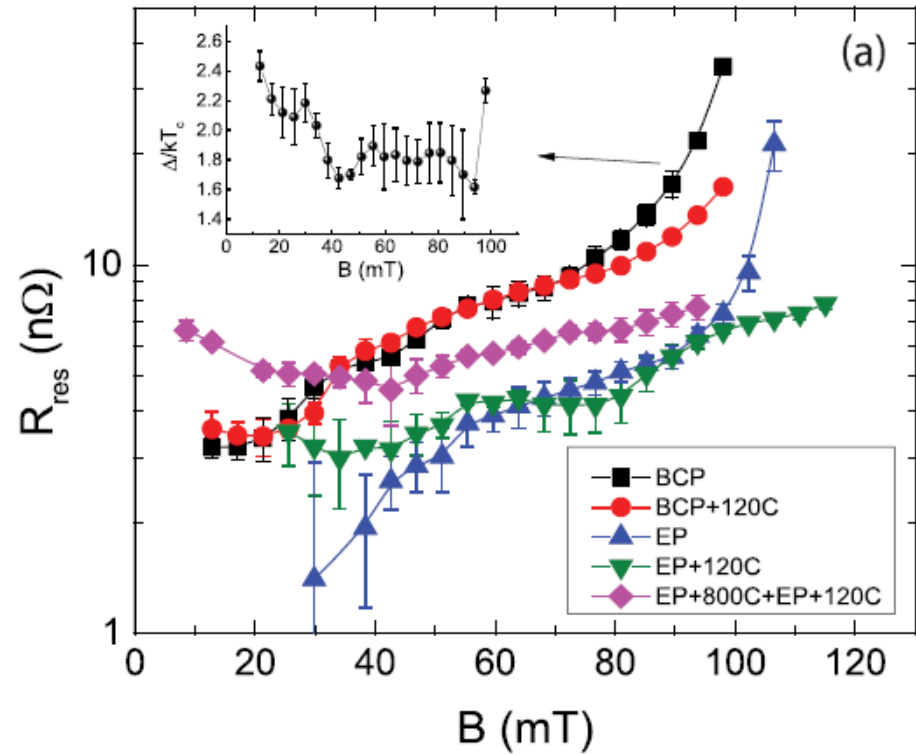
N-doping/N-infusion for 1.3 GHz cavity



N-doping for PIP-II 650 MHz single-cell cavity



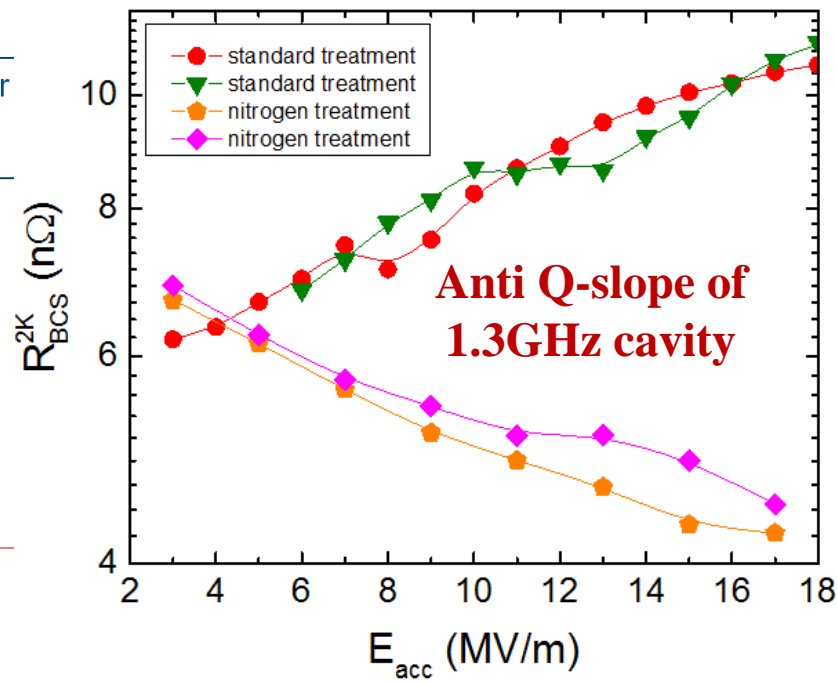
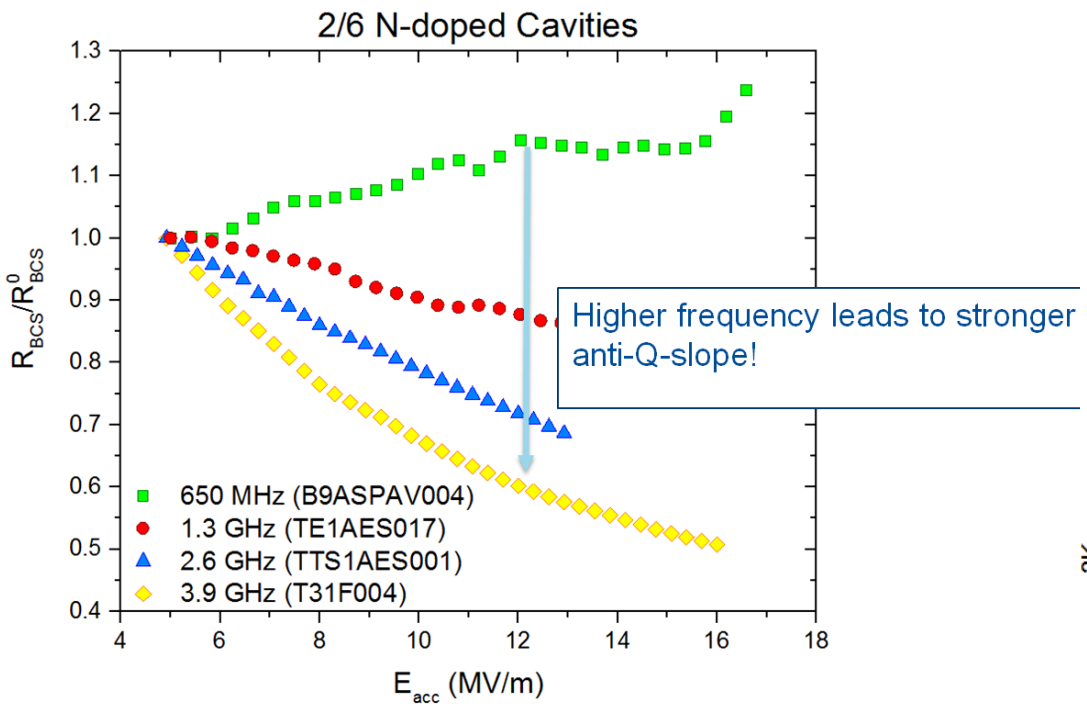
# 超导腔表面电阻与场强的关系





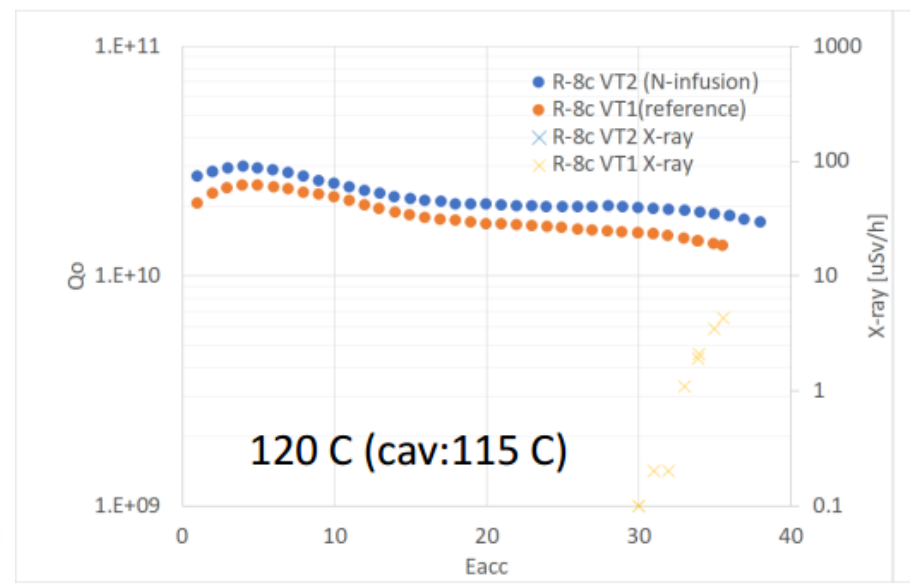
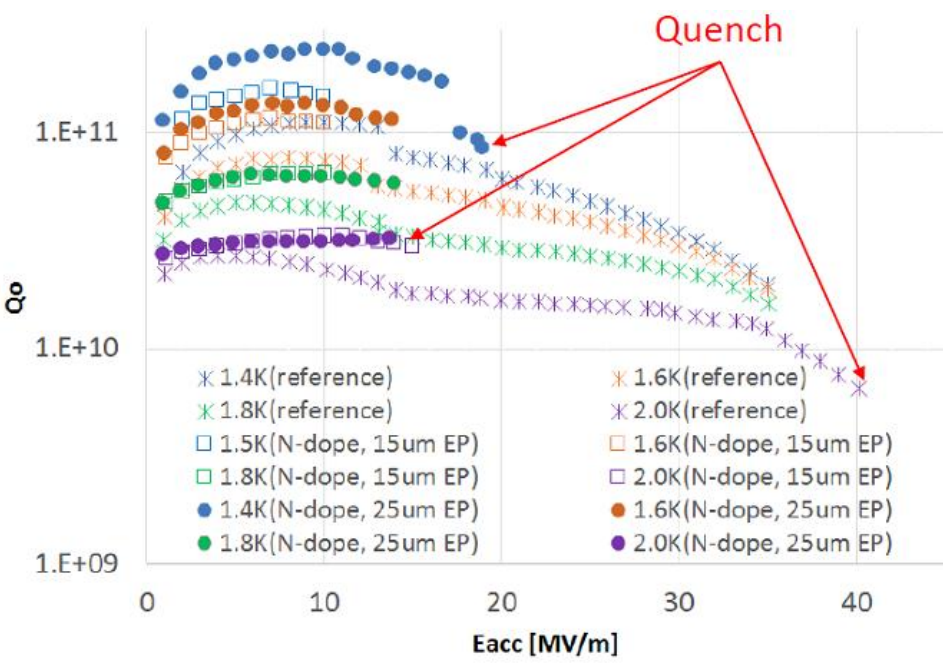
# 不同频率超导腔的掺氮效果

频率越高，掺氮的效果越显著！





# KEK超导腔的掺氮研究

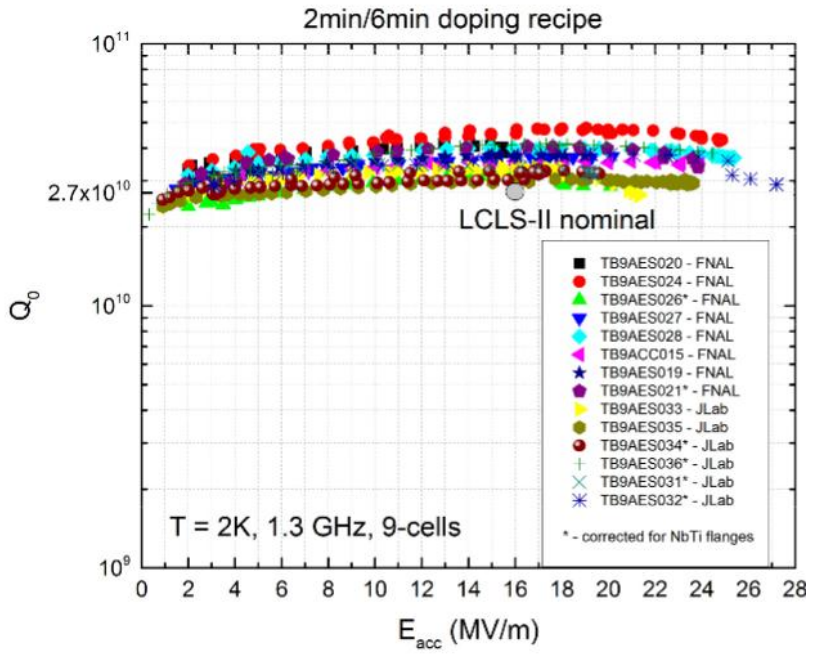
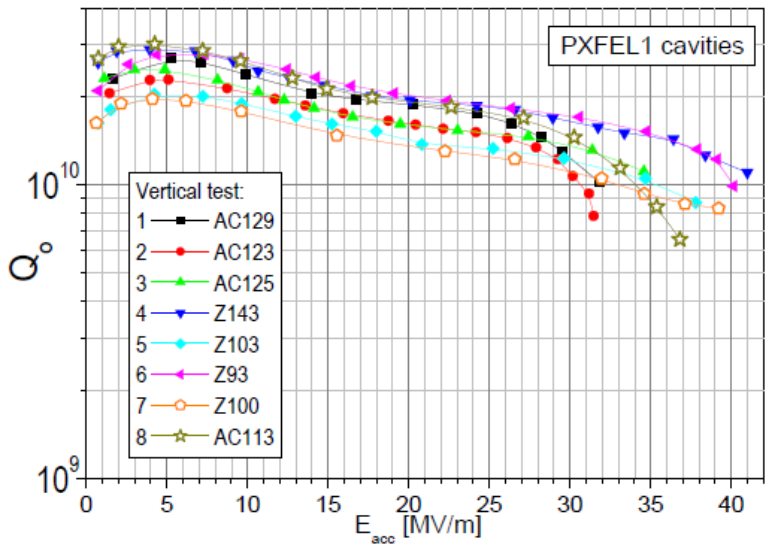


Kensei Umemori, N-doping/infusion study in KEK/J-PARC, LCWS2017

Kensei Umemori, N-infusion at KEK/J-PARC, TTC meeting 2018



# E-XFEL与LCLS-II超导腔的测试结果对比



**1.3 GHz 9-cell超导腔测试结果 (E-XFEL)**  
 设计指标:  $Q_0=1e10@Eacc=23.6MV/m$

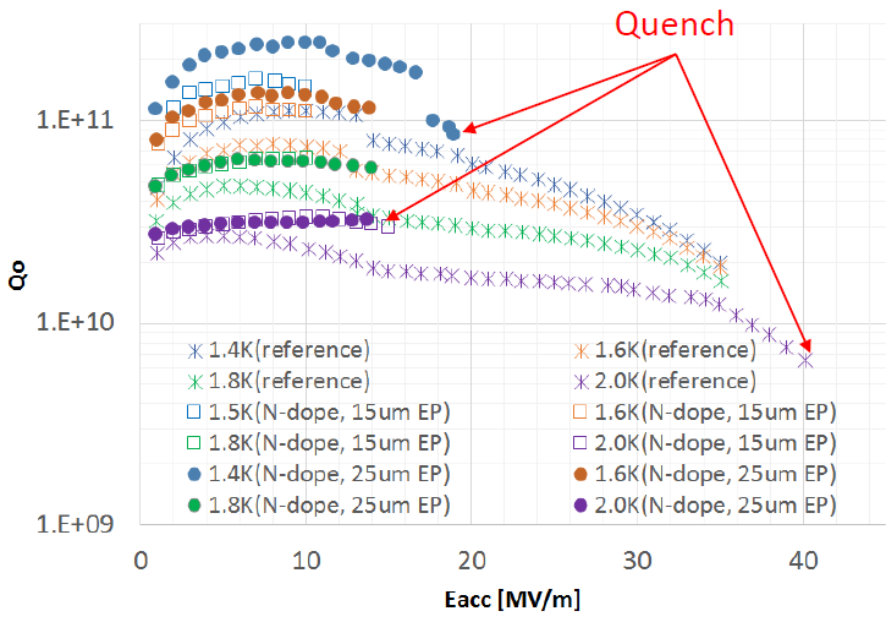
**1.3 GHz 9-cell超导腔测试结果 (LCLS-II)**  
 设计指标:  $Q_0=2.7e10@Eacc=16MV/m$





# KEK的超导腔掺氮研究

R-6(single-cell) VT4:reference / VT5:N-dope (15um EP)/VT6: (15+) 10umEP



- Very high Q up to high field
- Q = 2.4e11@11MV/m, 1.4K
- Q = 3.3e10@14MV/m, 2.0K
- Quench at 19MV/m
- No field emission
- First success in Japan

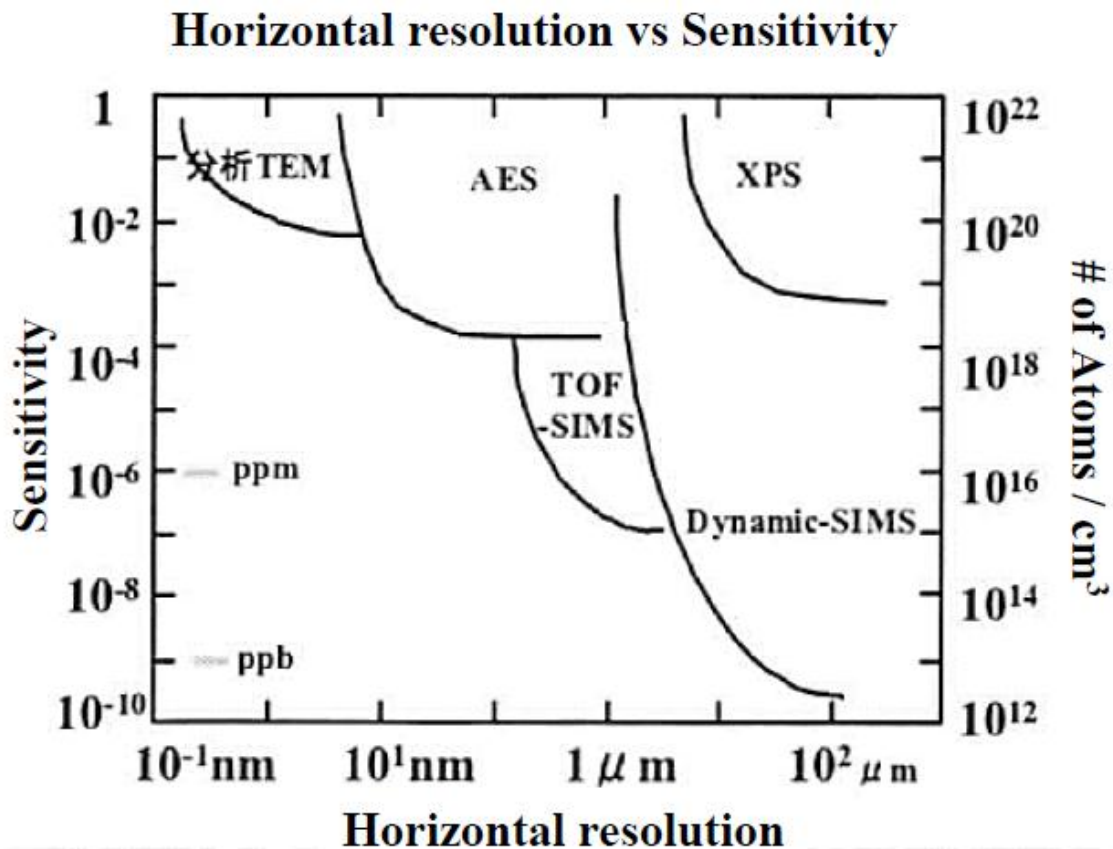
Kensei Umemori, N-doping/infusion study in KEK/J-PARC, LCWS2017





## 掺氮样片的测试内容

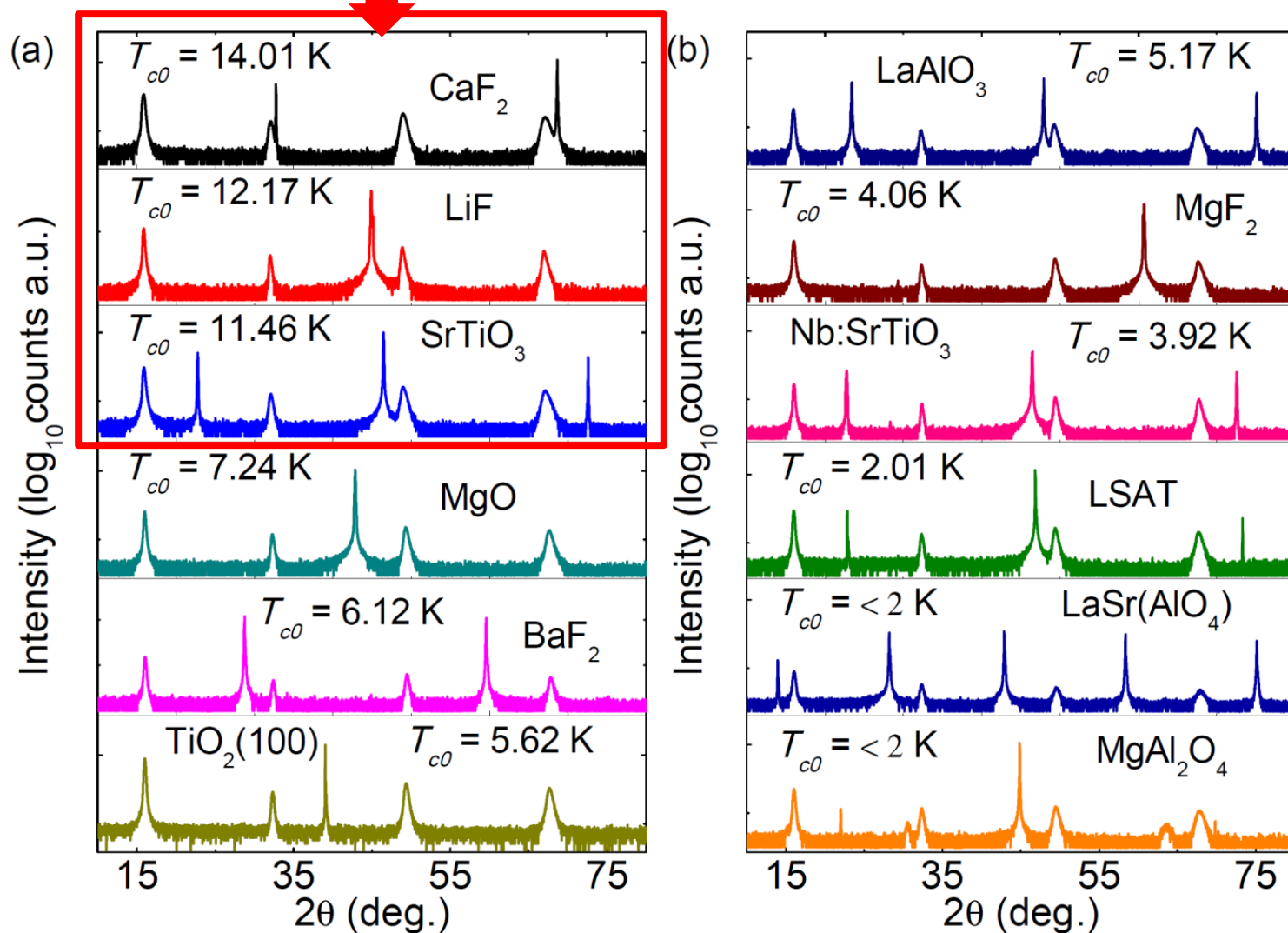
包括：常规化学分析（右图）和超导性能测试（R-T、M-T、伦敦穿透深度、相干长度、费米速度、平均自由程、能量间隙.....）。





# 高于块体 $T_c$ 十二种衬底

160 nm



## 高质量FeSe超导薄膜