

# 利用含氮金刚石快速冷却微纳机械振子的振动状态

张建奇 闫磊磊 冯 芒

(中国科学院武汉物理与数学研究所 430071)

据英国《每日邮报》最近报道，一颗重达 8.41 克拉的粉色钻石将在英国伦敦展出。该钻石是由全球最大的钻石商南非的德尔比斯公司于 2013 年发掘出的，目前估价为一千万英镑（约合一亿人民币），并计划在香港苏富比拍卖行进行拍买。

我们不禁的要问，为什么这颗钻石不是和普通的钻石一样表现为无色透明的状态，而是闪耀着粉色的光芒？我们知道，钻石也叫金刚石，是硬度最高的天然矿物，它是一种高密度的碳晶体。当金刚石内每个碳原子都和周围的四个碳原子紧密链接时，内部不会存在任何缺陷，它将呈现为无色透明状态；而当金刚石内缺失某一个碳原子（称为空穴）或者碳原子被其他杂质（电子空穴或其他离子）替代时，这种内部的缺陷会改变金刚石对自然光的吸收特性，使金刚石呈现出各种不同的颜色。例如，存在空穴色心时，展现为粉色；存在硼离子时，表现为蓝色；存在氮离子时，金刚石则会呈现出黄色。而上面提到的这颗粉色金刚石的色彩正是来自其内部存在的色心空穴，该缺陷导致金刚石不再表现为普通的无色状态而是呈现出粉色。

## 一、含氮金刚石与微纳机械振子

在不同颜色的金刚石中，闪耀着黄色光芒的含氮金刚石最近引起了量子物理学家的极大兴趣。此类金刚石是由一个氮原子替代了一个空穴周围的某个碳原子形成的。因此，它的内部存在一个被束缚的来自氮原子的电子。该电子与原有体系的价电子形成自旋  $S=1$ 。即便在没有外加磁场的条件下，自旋间的相互作用会在基态分量  $m_s=0$  与  $m_s=\pm 1$  之间产生一个 2.87 GHz 的能级分裂。这不仅使得此类金刚石拥有非常丰

富的内态能级结构，也使其在室温下拥有非常长的退相干时间。所谓退相干时间是指含氮金刚石内的电子自旋从上能态自发衰减到下能态的时间或者是量子态失去其相干性的时间。目前，含氮金刚石的基态电子自旋的衰变时间 ( $T_1$ ) 在室温条件下能长达 1 ms；而经过特殊处理的含氮金刚石中基态电子自旋的去相时间 ( $T_2$ ) 在室温条件下也能达到毫秒量级。因此，含氮金刚石可以被当作量子比特使用，用来处理和存储量子信息。

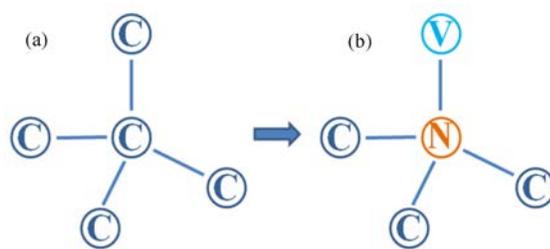


图1 (a)无缺陷的金刚石结构；(b)含氮金刚石的缺陷结构(C, N, V 分别表示碳原子、氮原子、空穴)

富的内态能级结构，也使其在室温下拥有非常长的退相干时间。所谓退相干时间是指含氮金刚石内的电子自旋从上能态自发衰减到下能态的时间或者是量子态失去其相干性的时间。目前，含氮金刚石的基态电子自旋的衰变时间 ( $T_1$ ) 在室温条件下能长达 1 ms；而经过特殊处理的含氮金刚石中基态电子自旋的去相时间 ( $T_2$ ) 在室温条件下也能达到毫秒量级。因此，含氮金刚石可以被当作量子比特使用，用来处理和存储量子信息。

微纳机械振子是微米或者纳米尺寸的机械振子。我们将一把尺子的一端固定在桌子上，而另一端悬空置于桌子外面。如果我们用力拍打一下悬空的一端，就会发现尺子会沿着一个特定的方向不停的振动，在相当长的一段时间内振动不会停止。在物理上，我们将这种振动称为机械振动，而振动的尺子则被称为机械振子。我们假设这个尺子的长度被缩小到一个可见光频段的光波长大小，这个机械振子就变成了微米或者纳米量级的微纳机械振子。由于其大小属于介观尺度（即介于宏观尺度和微观尺度之间），微纳机械振子兼具宏观物体的经典性质和微观物体的量子性质，这不仅使其迅速发展为量子光学和纳米技术交叉研究

领域的前沿研究热点，更成为研究宏观物体量子性质的理想平台，在精密测量、传感器以及量子信息处理等方面拥有巨大的潜在应用价值。

## 二、为什么要冷却微纳机械振子

微纳机械振子上的量子性质常常会被其所附着的热噪声覆盖。为了研究和利用微纳机械振子的量子性质，我们就必须压制这些热噪声。这就如同我们在嘈杂的环境中无法听清楚距离较远的声音一样，只有压制了噪声，我们才能听清楚那个声音。

热噪声与温度有直接关系，温度越高，噪声越大。所以，我们要做的就是将微纳机械振子的振动状态冷却到一个较低的温度。已有大量的研究工作提出了各种冷却微纳机械振子的方案，其核心思想是通过引入外力或者辅助体系来增加微纳机械振子的有效能量耗散，通过损耗热声子数最终实现冷却。换言之，就是要通过外力或者辅助体系与微纳机械振子间发生相互作用来增加微纳机械振子上的有效阻力，最终将微纳机械振子的热能降到最低。

## 三、含氮金刚石与微纳机械振子之间的相互作用

上文提到，完成微纳机械振子的冷却首先需要实现微纳机械振子与外力或辅助体系的相互作用。下面我们介绍如何实现含氮金刚石与微纳机械振子之间的相互作用。

众所周知，简并的电子自旋态会在外加磁场下发生塞曼分裂，其分裂的能级差会随着外加磁场的增大而变大。如果将含氮金刚石晶体放置在一个梯度磁场中，并将产生梯度磁场的永久磁头集成在微纳机械振子的自由端（图2），那么，当梯度磁场随着微纳机械振子一起振动时，含氮金刚石的电子自旋态间的能级差便会随之发生改变，其改变量依赖于微纳机械振子上磁头的位置。这样就可以将微纳机械振子的振动与含氮金刚石的自旋态耦合起来了。上述相互作用方

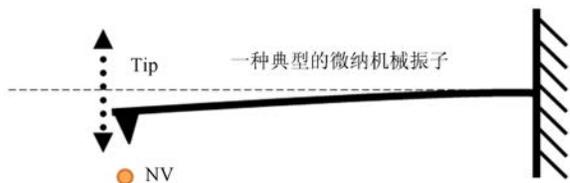


图2 微纳机械振子与含氮金刚石耦合的示意图（图中 Tip 代表随微纳机械振子的振动磁头，NV 代表含氮金刚石）

式最早由 P. Rabl 等人于 2009 年提出，随后便被广泛应用于含氮金刚石与微纳机械振子的杂合系统中制备量子态、处理量子信息以及冷却微纳机械振子等方案。

## 四、利用含氮金刚石实现微纳机械振子的快速冷却

下面我们简要介绍两种实现微纳机械振子的快速冷却的方法：基于有效电磁诱导透明的冷却方案和基于斯塔克移动门操作的冷却方案。

### 1. 基于有效电磁诱导透明的冷却

与电磁诱导透明相关的冷却是一种基于量子干涉的冷却。原子内的电子从高能态自发跃迁到基态，会释放出一个光子。由于动量守恒，原子将会受到一个光子动量的反冲，从而获得一个反向动能。虽然自发辐射是一个随机过程，但其平均效应是一种量子涨落，会造成原子被加热。由于反冲效应只是单纯的内态跃迁，与原子振动的声子数无关，因此，这个过程被称之为载流子跃迁（carrier transition）。要抑制这个加热过程，就是要抑制这个光子的产生，而让其消失的最好方法就是利用量子干涉效应：当两个辐射过程产生的光子存在一个  $\pi$  相位差时，这两个光子将会相互抵消。由于电磁诱导透明的冷却方案可以消除这个光子反冲的随机过程，所以能比普通的边带冷却方案更好地完成相关冷却。

我们考虑的有效电磁诱导透明的冷却模型如图3(a)，微纳机械振子的自由端附着有一个含氮金刚石，在外加梯度磁场的作用下，其两个基态间的能量差依赖于微纳机械振子自由端的位置，相应的耦合强度为  $\lambda$ 。需要注意的是，含氮金刚石中的激发态  $|A_2\rangle$  由  $m_s=+1$  和  $m_s=-1$  等组分构成，基态  $|\pm 1\rangle$  到激发态  $|A_2\rangle$  的跃迁依赖于外加光场的偏振方向。因此，我们可以用两个不同偏振的光实现基态  $|\pm 1\rangle$  到激发态  $|A_2\rangle$  的跃迁。此外，在塞曼效应的影响下，含氮金刚石中存在另一个由二阶过程引发的激发态  $|A_1\rangle$ 。但是，这两个激发态  $|A_2\rangle$  和  $|A_1\rangle$  之间的能隙  $\Delta_{A_2-A_1} \approx 2\pi \times 2.5 \text{ GHz}$  远大于梯度磁场变化引入的能量变化，所以，梯度磁场变化对激发态  $|A_2\rangle$  的影响可以忽略不计。

在施加的偏振光场满足双光子共振条件时，电子从基态  $|-1\rangle$  到激发态  $|A_2\rangle$  再回到基态  $|-1\rangle$  的路径

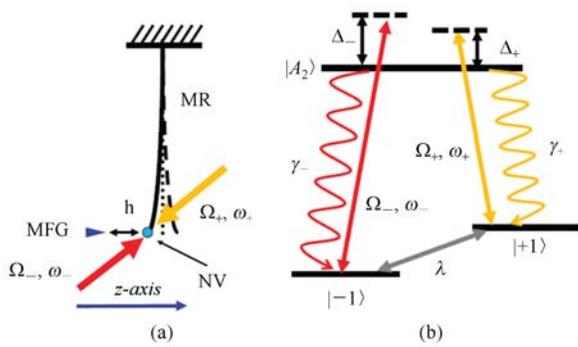


图3 (a) 有效电磁诱导透明冷却的系统示意图 (MR 代表微纳机械振子, MFG 是外加梯度磁场, NV 代表含氮金刚石, 且含氮金刚石的平衡位置与梯度磁场源之间的距离为  $h$ ,  $\Omega$  和  $\omega$  代表两个光场的强度和频率) (b) 含氮金刚石的内态及其与外加光场和磁场的耦合 ( $\lambda$  代表含氮金刚石的内态在外加梯度磁场下与微纳机械振子的振动态的耦合,  $\gamma_+$ ,  $\gamma_-$  为激发态的自发辐射率), (来自 J.Q. Zhang et al, Opt. Express 21 (2013) 29695)

有两条: ( $|−1\rangle$  先到  $|A_2\rangle$  再到  $|−1\rangle$ ) 和 ( $|−1\rangle$  先到  $|A_2\rangle$  再到  $|+1\rangle$  回到  $|A_2\rangle$  终到  $|−1\rangle$ ) , 且这两个跃迁过程相差一个  $\pi$  的相位。同理, 对于基态  $|+1\rangle$  则有类似的两条路径: ( $|+1\rangle$  先到  $|A_2\rangle$  再到  $|+1\rangle$ ) 和 ( $|+1\rangle$  先到  $|A_2\rangle$  再到  $|−1\rangle$  回到  $|A_2\rangle$  终到  $|+1\rangle$ ) 。考虑到常规的电磁诱导透明冷却方案中声子耦合是通过从基态到激发态的跃迁实现的, 而图 3 中的方案则是由基态间的耦合实现的, 所以, 我们将这个冷却方案称为有效电磁诱导透明冷却。

图 3 (b) 中由  $|\pm 1\rangle$  和  $|A_2\rangle$  构建的三能级系统, 在满足双光子共振的条件下, 可以通过某些数学变换改写为由  $|d\rangle$  和  $|+\rangle$  构成的有效两能级系统, 在此过

程中, 通过两种不同途径产生的相差  $\pi$  相位的光子辐射过程可以等效为一个不产生任何反冲动量的光子暗辐射过程。从含氮金刚石和微纳机械振子组成的杂化系统所对应的吸收谱图 4 (a) 看, 杂化系统对载流子跃迁  $|n\rangle \rightarrow |n\rangle$  的能量没有任何吸收, 即载流子跃迁被禁止。另一方面, 在外加驱动光场所诱导的量子干涉作用下, 有效二能级系统中依旧存在用于冷却的一阶红边带跃迁  $|n\rangle \rightarrow |n-1\rangle$  和用于加热的一阶蓝边带跃迁  $|n\rangle \rightarrow |n+1\rangle$  。图 4 (a, b) 显示, 一阶红边带跃迁被增强, 而一阶蓝边带跃迁则被强烈抑制了。

从图 3 (b) , 我们可以理解有效电磁诱导透明的冷却机理。假设含氮金刚石内的电子态初始处于态  $|d, n\rangle$  , 在外加光场和塞曼效应的共同作用下, 只有导致冷却的跃迁 ( $|d, n\rangle \rightarrow |+, n-1\rangle$ ) 占主导地位, 而阻碍冷却的载流子跃迁 ( $|d, n\rangle \rightarrow |+, n\rangle$ ) 和一阶蓝边带跃迁 ( $|d, n\rangle \rightarrow |+, n+1\rangle$ ) 则分别被量子干涉效应完全抑制和强烈抑制。因此, 如果系统从  $|d, n\rangle$  被激发到态  $|+, n-1\rangle$  , 随后便会自发辐射地衰减到态  $|d, n-1\rangle$  。这时, 与初始态比较, 我们会发现振动状态中的一个声子被消耗掉了。如此往复, 振动态的声子便会逐渐减少到趋近于零。

当外加驱动光场被调到双光子共振时, 通过图 4 (a) , 我们知道系统中占优的是一阶红边带跃迁的冷却过程而非一阶蓝边带跃迁的加热过程。所以, 在冷却过程中尽管存在一阶红边带的冷却过程与一阶蓝边带的加热过程之间的竞争, 但系统内的热声子数仍

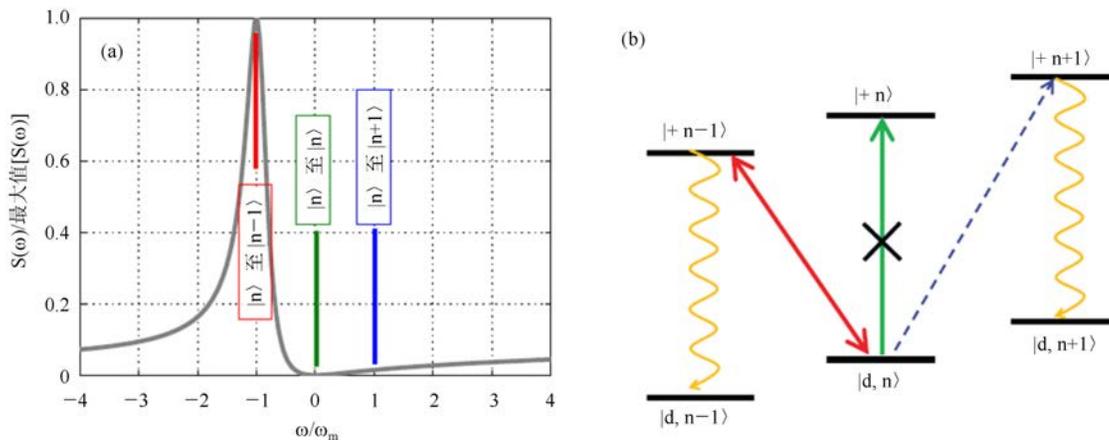


图4 (a) 有效电磁诱导透明冷却模型的光学吸收谱 (其中  $|n\rangle$  为声子态) (b) 约化为两能级系统的冷却机制示意图 (其中  $|*, * \rangle$  中前者表示金刚石的自旋态, 后者为微纳机械振子的振动态), (来自 J.Q. Zhang et al, Opt. Express 21 (2013) 29695)

将持续消耗下去，直到最后冷却过程产生的冷却效果和加热产生的加热效果完全抵消，微纳机械振子进入新的平衡态。在上述过程中，通过选取合适的参数，我们估算最终微纳机械振子可以进入平均声子数小于 1 的振动基态。

由于所有的冷却耗散都是借助含氮金刚石和微纳机械振子的耦合  $\lambda$  实现的，因此，无论哪种冷却方案，冷却速率  $W$  一定不会超过该耦合强度  $\lambda$ 。在上述冷却方法中，由于量子干涉效应抑制了光子的反冲，其冷却率可以达到  $W \geq 0.38\lambda$  以上，相比其他方案，这个冷却效率更接近于耦合强度  $\lambda$ 。因此，利用有效电磁诱导透明的冷却方案可以更快地实现微纳机械振子的冷却。

## 2. 基于斯塔克移动门操作的冷却

斯塔克效应是德国科学家斯塔克在 1913 年发现的，描述了原子发出的谱线在外加电场作用下产生分裂的现象。基于斯塔克移动门操作的冷却利用的是一种光学斯塔克效应，它是指在外加光场作用下电子的两个自旋态发生能级分裂，且该能级分裂（亦被称为斯塔克能级移动）与外加光场强度成正比。

我们考虑的斯塔克移动门操作的冷却如图 5 (a)。从图上可以看出该模型与前面提到的有效电磁诱导透明冷却的唯一不同点是：在基态的两个电子自旋态 ( $|\pm 1\rangle$  态) 之间增加了一束经典驱动场，该驱动场可以实现电子上下自旋之间的来回翻转。因此，该方案可以看作是对有效电磁诱导透明冷却的进一步改进

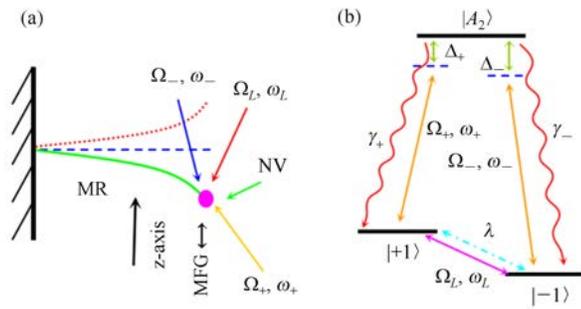


图 5 (a) 基于斯塔克移动门操作的冷却模型 (这里 MR 代表微纳机械振子, MFG 则是外加梯度磁场, NV 代表含氮金刚石, 它同时与两个光场以及一个驱动场发生耦合) (b) 含氮金刚石的內态结构及其与外加光场和磁场的耦合 (来自 arXiv:1406.1611)

和发展。

外加光场在驱动基态向激发态的跃迁过程中，由于外加光场满足双光子共振条件，且强度相等，体系的基态  $|\pm 1\rangle$  重新组合成亮态  $|b\rangle$  和暗态  $|d\rangle$ ，它们分别对应于基态叠加后产生的高能态和零能态。此时，外加驱动场的作用表现为在两个基态的叠加态  $|b\rangle$  和  $|d\rangle$  之间形成的一个斯塔克移动，且该频率移动的大小与驱动场的强度相同。

如果驱动场的强度与微纳机械振子的振动频率接近时，借助梯度磁场产生的微纳机械振子和含氮金刚石內态的耦合，就可以实现基于斯塔克移动门操作的冷却。在增加了外加光场之后，该系统的吸收谱为图 6 (a)。对比图 4 (a) 和图 6 (a)，我们可以看出，与有效电磁诱导透明相比，利用斯塔克移动门操作，同样可以将载流子跃迁 ( $|n\rangle \rightarrow |n\rangle$ ) 完全抑制住，

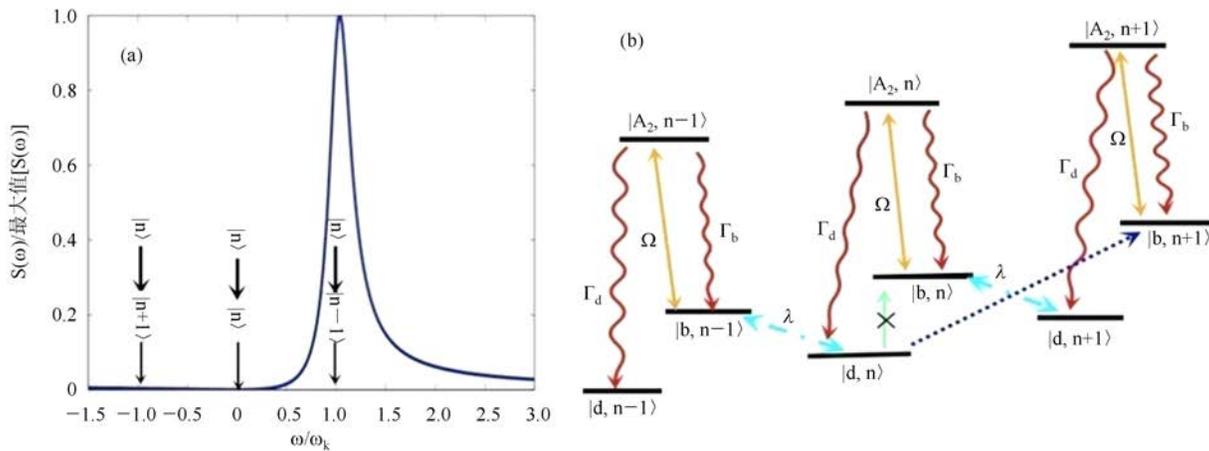


图 6 (a) 斯塔克移动门操作冷却模型的光学吸收谱 (b) 斯塔克移动门操作的冷却过程可约化为一个  $\Lambda$  型三能级系统 (来自 arXiv:1406.1611)

此外，它也可以增强用于冷却的一阶红边带跃迁 ( $|n\rangle \rightarrow |n-1\rangle$ )，而且能够更好地抑制一阶蓝边带跃迁 ( $|n\rangle \rightarrow |n+1\rangle$ )。这使得该冷却方案可以更加有效地冷却微纳机械振子的振动态。

斯塔克移动门操作的冷却机制可简要叙述如下：假设含氮金刚石内的电子态初始处于态  $|d, n\rangle$ ，在外加光场和梯度磁场的联合作用下，只有导致冷却的跃迁 ( $|d, n\rangle \rightarrow |b, n-1\rangle$ ) 占主导地位，而阻碍冷却的载流子跃迁 ( $|d, n\rangle \rightarrow |b, n\rangle$ ) 和一阶蓝边带跃迁 ( $|d, n\rangle \rightarrow |b, n+1\rangle$ ) 则分别被量子干涉效应和斯塔克移动门操作完全抑制和强烈抑制。因此，如果体系在梯度磁场耦合下从  $|d, n\rangle$  跃迁到  $|b, n-1\rangle$ ，再被外加光场激发到激发态  $|A_2, n-1\rangle$ ，随后便会自发辐射地衰减到  $|d, n-1\rangle$ 。这时，与初始态比较，微纳机械振子的振动状态中的一个声子被消耗掉了。如此往复，振动态的声子便会逐渐减少到趋近于零。根据计算，对于低频微纳机械振子，其冷却率可以高达  $W \geq 0.63\lambda$ 。

相比电磁诱导透明冷却，基于斯塔克移动门操作的冷却具有如下优势和特点：首先，后者非常适用于冷却较低振动频率的微纳机械振子；其次，通过引入驱动场和斯塔克移动门操作，在冷却低频微纳机械振子的过程中，后者的冷却速率可以达到甚至超过前者在冷却高频微纳机械振子时的冷却速率，因此，它可以实现更加快速的冷却；另外，后者的冷却方法对于冷却光的强度需求要比前者小一个数量级以上；特别需要指出的是，对于不同的振动频率，斯塔克移动门操作的冷却速率均能优化到接近最大值。

### 五、总结与展望

微纳机械振子的研究是量子光学和纳米科学交叉的一个研究前沿，近年来获得了非常迅猛的发展。该领域如今的研究主要集中在以下几个方面：首先是微纳机械振子的冷却，包括压电冷却、光力冷却和量子比特辅助冷却等；其次是有关微纳机械振子量子性质的研究及应用，包括如何产生和观察微纳机械振子上的各种玻色子效应，如声子阻塞、声子诱导透明等；再次就是有关微纳机械振子的杂化系统的量子性质研究及应用，包括光力学和微纳机械振子与量子比特耦

合系统的量子性质及其在量子信息处理、高精度成像和精密测量领域的研究。最后是如何实现微纳机械振子上从量子微观世界到经典宏观世界的渡越，并在此基础上理解退相干等基本物理概念。

通过前面的介绍，我们知道，利用外加梯度磁场可以实现含氮金刚石与微纳机械振子振动的耦合，还可以利用外加光场驱动含氮金刚石的光频段的能级跃迁，实现微纳机械振子的快速冷却，其冷却率可以达到以前从未有过的量级。此外，在引入斯塔克移动门操作后还可以进一步提高上述冷却率。之所以如此，其根本原因是由于量子干涉（以及斯塔克移动门操作）可以在增强红边带跃迁并抑制载流子跃迁和蓝边带跃迁。

这些利用含氮金刚石冷却微纳机械振子的研究为实验上研究微纳机械振子的量子特性奠定了理论基础，并为进一步冷却微纳机械振子的振动态提供了新的理论方法。随着量子光学实验技术和微纳加工技术的进一步发展，我们相信，微纳机械振子的声子模式的量子理论必将有助于我们深化对宏观量子性质和退相干过程等物理过程的理解，并进一步推动量子信息处理实用化以及实现精度更高的可突破量子极限的精密测量技术。

### 作者简介：

张建奇，男，博士后，主要从事量子信息的理论研究，主要研究兴趣：光机械体系的冷却和量子信息处理；量子光学。

冯芒，男，研究员，博士生导师，主要从事量子信息和原子分子物理的理论和实验研究，目前的主要研究兴趣：原子和固态体系的量子计算；量子光学和量子力学的某些基本问题。

