

穿透式共振器量測量子位元的狀態改變

姓名：余杰致 & 黃華偉 (書面報告) 謝苑婷 & 林彥叡 (簡報) 張育瑄 (口頭報告)

組別:A2

摘要： 此實驗透過光子與量子位元的交互作用，進行間接量測。而光子與量子位元反應並不明顯，因此透過共振腔讓足夠光子與量子位元耦合後進行量測。而量子位元狀態的變化，我們透過有無 dispersive shift 區分現在量子位元所處之本徵態。為觀察此現象，我們用 SQUID 得出不同頻率之量子位元。選定好該頻率之量子位元後，將此頻率之量子位元與共振腔耦合，並施加外加能量激發該量子位元，觀察共振腔內外加能量大小對各頻率光強度變化。最終確立在 bare cavity 或 dressed cavity 頻譜中心頻率下，由量測 VNA 能量大小觀測量子位元所處之狀態。

Keywords: 量子位元、共振器、SQUID、dispersive shift

I. 實驗內容

根據量子力學，我們可以知道若是直接對量子位元進行量測，會造成波函數崩塌，並強迫量子位元進入某一本徵態。因此此實驗透過間接量測，也就是光子與量子位元間進行的交互作用來間接量測。而光子與量子位元反應並不明顯，因此透過共振腔讓足夠光子與量子位元耦合後進行量測。實驗原理將從量子物理模型中解出與光子耦合之 eigenvalue 切入探討。

II. 實驗原理

Anti-crossing 現象原理

將代表量子物理模型系統能量的模型矩陣求解，

$$H = \hbar \begin{pmatrix} \omega_q & g \\ g & \omega_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

可得

$$\omega_{\pm} = \omega_0 \pm \sqrt{\frac{\Delta^2}{4} + g^2} \quad (2)$$

其中

$$\omega_0 = \frac{\omega_q + \omega_r}{2}, \Delta = \omega_q - \omega_r$$

根據上式我們可以預測其解為雙曲函數，會有 anti-crossing 現象。其中 ω_r 為共振器的固有頻率， ω_q 為量子位元的激發能量。而我們可以利用式(2)進行雙曲線擬合得到 g ，粗估為 0.0237GHz。而當光子與量子位元頻率相同時為真空拉比

震盪，兩本徵態相差 $2g$ 。 $g^2/\Delta =$ dressed cavity 與 bare cavity 的頻率差。 g 越大量子位元可以離共振器頻率越遠，此時耦合強度較大；但同時 coherence time 會變短，因此在設計上會選擇一個合適的組合。

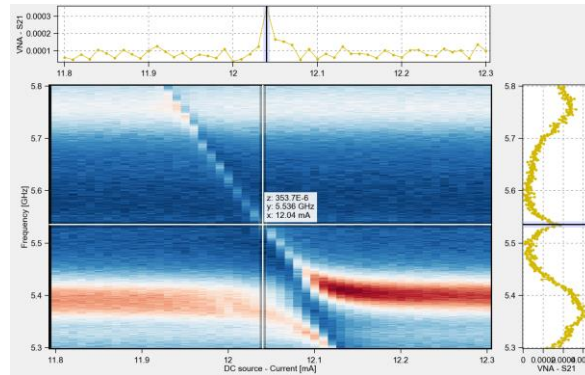


FIGURE 1. 量子位元與共振腔內光子耦合，產生 anti-crossing。光子與量子位元頻率相同時會產生能階分裂現象。

量測量子狀態原理 -dispersive shift

從 anti-crossing 現象我們可知道量子位元在與光子耦合時，共振腔內頻譜會產生 dispersive shift。因此，我們找出量子位元對應之頻率，對此量子位元施加該頻率之能量，由低至高慢慢地施加，並觀察共振腔內之變化。

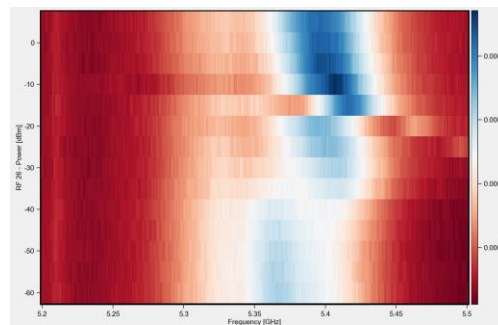
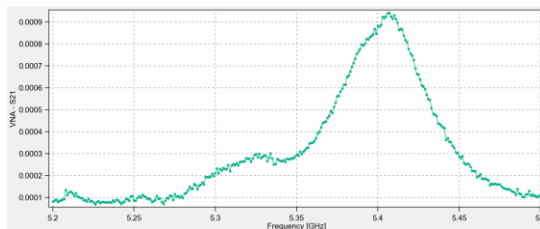
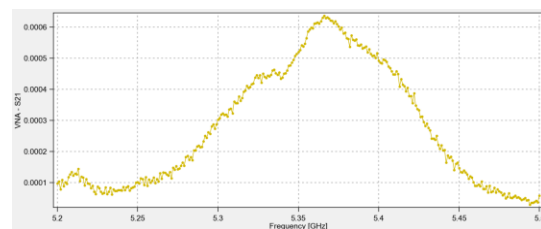


FIGURE 2. 施加 5.538GHz 之不同能量下，共振腔內光子光譜。上方為 Bare cavity，下方為 Dressed cavity。

而我們觀察不同能量下共振腔內光子之頻譜，我們可發現依量子位元有無與共振腔內光子耦合分為：沒與光子耦合的 Bare cavity、與光子耦合產生 dispersive shift 後的 Dressed cavity。



(a) Bare cavity



(b) Dressed cavity

FIGURE 3. 共振腔內光子頻率-強度分佈圖。(a) 量子位元處於激發態，光子不與量子位元產生交互作用，此時為 Bare cavity 光譜圖。(b) 量子位元處於基態與光子進行交互作用，形成 Dressed cavity 光譜圖。

III. 實驗結果

觀察不同能量下我們可用有無 dispersive shift 來區別量子位元之狀態。當量子位元處於激發態時，頻譜分佈圖為 Bare cavity 分布，此時加入 -10dB 能量下光子之 VNA Power 最高；而量子位元處於基態時，量子位元與光子耦合，光譜圖發生 dispersive shift 轉為 Dressed cavity 分布，此時加入 -60dB 能量下光子之 VNA Power 最高。

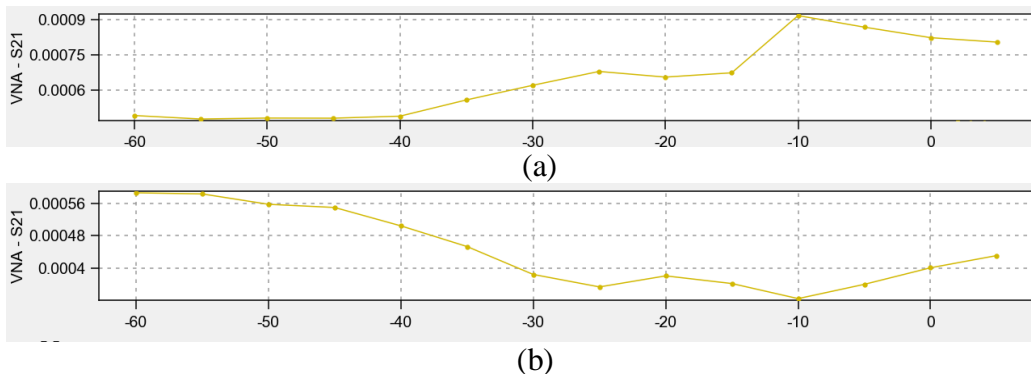


FIGURE 3. (a) 在 Bare cavity 下，不同能量時之 VNA Power. (b) 在 Dressed cavity 下，不同能量時之 VNA Power.

結論，我們可利用 dispersive shift 現象，在 Dressed cavity 或 Bare cavity 情況下之頻率，觀察 VNA Power 值與量子位元能態之關係。在 Dressed cavity 情況下時，若量得之 VNA Power 接近 0.00047 時為基態，量得之 VNA Power 接近 0.0009 時為激發態。在 Bare cavity 情況下時，若量得之 VNA Power 接近 0.00057 時為基態，量得之 VNA Power 接近 0.0004 時為激發態。

IV. 致謝

感謝這次各大學及科技部所舉辦的「大專生量子科技暑期學校」活動，藉由這次活動我們得以更深入了解量子電腦相關科技。同時也感謝各位教授在前四天的課程教學。讓我們對其背後的數學及物理意義有了基本的了解。最後也感謝帶我們實驗的博士生，透過在實作課程中操作量子量測相關的實驗，對於課程教學所學的知識有個完美的總結，也對量子電腦有更深入的了解，擁有操作基本的量子量測的能力。

V. 參考資料

1. S. Probst, F. B. Song, P. A. Bushev, A. V. Ustinov, and M. Weides, Rev. Sci. Instrum.

86 (2), 024706 (2015).

2. A. Wallraff, D. I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R. S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, *Nature* 431 (7005), 162 (2004).
3. Alexandre Blais, Ren-Shou Huang, Andreas Wallraff, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, *Physical Review A* 69 (6), 062320 (2004).
4. 實驗講義 Lab training