

## 18pAK-8

## Polarization switching of injection-locked semiconductor laser, VCSEL

<sup>b</sup>Department of Information and Communication Engineering, The University of Tokyo, Japan<sup>a</sup> E.L.Ginzton Laboratory, Stanford University, California, USA<sup>a</sup> Nihon University, Tokyo, Japan

Md Javed Rouf Talukder<sup>a,b</sup>, Shoko Utsunomiya<sup>a</sup>, Naoto Namekata<sup>a</sup>, Shuichiro Inoue<sup>a</sup>, Kenta Takata<sup>a,b</sup>, Kai Wen<sup>a</sup>, Kai Yan<sup>a,b</sup> and Yoshihisa Yamamoto<sup>a,b,c</sup>

A vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) is considered as a candidate to implement injection-locked laser system that is proposed recently for solving Ising model which is regarded as a NP-complete problem in a 3D model. In the proposed scheme, two orthogonal polarization modes of a VCSEL represent up and down spins,  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$ , of an Ising model,  $H = (\sum_{ij} J_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_i \lambda_i \sigma_i)$ .

Each VCSEL, which works as a Ising spin, is coupled to other VCSELS (slave lasers) by mutual injection locking. We study the gain anisotropy of polarizations in VCSELS and introduce rate equations for analyzing the internal cavity photon fields, carrier numbers of vertical and horizontal polarization starting with the quantum mechanical Langevin equations for an injection-locked laser. Detuning parameter is determined by the frequency difference between a master laser and a slave laser. The internal and external cavity photon numbers, carrier numbers in a cavity and relative phase difference between a master laser and a slave laser are obtained in vertical and horizontal polarizations as a function of detuning. We have observed those characteristics by using a 852nm single mode VCSEL. Our experimental setup is shown in Fig1. Output photon numbers from a free running VCSEL in both linearly polarizations and we find that the spontaneous emission coupling efficiency  $\beta$  is  $10^{-4}$ . It has been shown that when injection locking occurs, output field is reduced by the effect of an internal loss in a cavity which is quantitatively consistent with the above-mentioned theory. In the case of semiconductor lasers, a master laser frequency which is locked to a slave laser on resonance, where a master and a slave laser are in-phase, is red shifted due to the linewidth enhancement factor. This asymmetric behavior of detuning dependent output photon field is experimentally observed. A detuning parameter is observed to be red shifted where a slave and a master laser are estimated to be in-phase theoretically. We also observe that the frequency difference between vertical and horizontal polarizations is less than 4.1 GHz. We will present our recent experimental result about the polarization switching of VCSELS.

## 18pAK-10

## ダイヤモンド中 単一 NV 中心における

## 4 粒子スピン系を用いた室温での量子もつれ生成

阪大院基礎工, 産総研<sup>A</sup>

下岡 孝明, 加藤 宙光<sup>A</sup>, 山崎 聡<sup>A</sup>, 三輪 真嗣, 鈴木 義茂, 水落 憲和

Entanglement generation using 4 spins in Diamond NV center at Room Temperature  
Osaka Univ., AIST<sup>A</sup>

T. Shimo-oka, H. Kato<sup>A</sup>, S. Yamasaki<sup>A</sup>, S. Miwa, Y. Suzuki, N. Mizuochi

固体中の量子系では人工的な物性制御が可能であるため、量子情報処理の実証研究が活発になされている。一方で固体中では量子系と環境との相互作用が強く量子状態が不安定であるため、多量子ビット化には困難が伴う。我々はこの問題に対し、室温で電子スピンの量子状態を維持可能なダイヤモンド中のNV中心に着目して研究を行なっている[1]。NV中心の単一電子スピンは光励起による分極と光検出、磁気共鳴による制御が可能であり量子ビットの有力な候補である。今回我々はNV中心に隣接した炭素<sup>13</sup>Cの核スピンの電子スピンとの超微細相互作用を介して制御・検出可能なことと利用し、単一NV中心の電子スピンと3つの<sup>13</sup>Cの核スピンを用いた4量子ビットでの量子もつれ生成を行った。

試料はCVD法で合成した人工高品質ダイヤモンドを用いた。また、<sup>13</sup>Cの天然存在率は1.1%しかなく、その格子位置も制御できないことから多量子ビット化には困難があったが、我々は<sup>13</sup>C濃度を8%まで高めた試料を用いることで多量子ビット化の効率化を行った。測定では第一近接の炭素3つ全てが<sup>13</sup>CであるNV中心を用いてGHZ状態、W状態の生成を試みた。評価は密度行列のtomographyを作成し、そのfidelityを用いた。図1はGHZの実部でのtomographyでありfidelityは0.72であった。講演ではW状態の結果も含め、多量子もつれの生成、評価について議論する。

[1] P. Neumann, N. Mizuochi, et al., *Science*, 320, 1326 (2008).

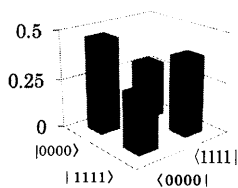


図1. GHZ 状態の密度行列.  
Fidelity = 0.72

## 18pAK-9

## Dicke 状態の拡張に必要な局所操作

阪大基礎工, ワシントン大<sup>A</sup>, 東大工<sup>B</sup>

小林俊輝, 生田力三, シャヒン・カヤ・オズデミル<sup>A</sup>, 山本俊, 小芦雅斗<sup>B</sup>, 井元信之

Conditions for local expansion of Dicke states

Osaka Univ., Washington Univ. in St.Louis<sup>A</sup>, Univ. of Tokyo<sup>B</sup>

Toshiki Kobayashi, Rikizo Ikuta, Şahin Kaya Özdemir<sup>A</sup>, Takashi Yamamoto, Masato Koashi<sup>B</sup>, Nobuyuki Imoto

これまで、多体エンタングル状態に対して局所操作を行い系をより大きくする方法が考えられてきた。多体エンタングル状態のうちGHZ状態、Cluster状態やW状態については1量子ビットに対する局所操作を行うことで系の大きさを拡張する方法が提案、実証されている[1-3]。しかし、一般のDicke状態についてはこのような操作は知られていなかった。本発表ではW状態を除くDicke状態が1量子ビットに対する局所操作では拡張できないことを示し、拡張するために操作しなければならない最小の量子ビット数の導出とその拡張操作を示す。

(1) 状態にある  $M_1$  個の量子ビットと  $|0\rangle$  状態にある  $N - M_1$  個の量子ビットで構成される  $M_1$  励起  $N$  量子ビット Dicke 状態のうち  $K$  量子ビットに対して局所操作し、 $M_1 + m_1$  励起  $N + n$  量子ビット Dicke 状態に拡張することを考える。Dicke 状態を、局所操作する  $K$  量子ビットと操作しない  $N - K$  量子ビットの2つの部分系に分解した時、そのSchmidtランクは  $N, M_1, K$  に依存し  $\min\{K, N - K, M_1, N - M_1\} + 1$  で与えられる。局所操作によってSchmidtランクが増加しないことから、 $n - m_1 > 0$  の時  $K \geq M_1$ 、 $m_1 > 0$  の時  $K \geq N - M_1$  という2つの条件を満たすことが必要となる。我々はこの条件の下でDicke状態を局所的に拡張する操作を構成した。また本発表では、あるDicke状態を拡張可能な操作がその他のどの様なDicke状態を拡張し得るのかについて調べた結果も示す。

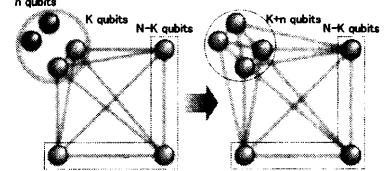


図1: 局所的拡張操作のイメージ図

[1] D. E. Browne and T. Rudolph, *Phys. Rev. Lett.* 95 010501 (2005).

[2] T. Tashima, et al., *New J. Phys.* 11, 023024 (2009).

[3] R. Ikuta, et al., *Phys. Rev. A* 83, 012314 (2011).

## 18pAK-11

## 動的デカップリング波形の数値自動生成

阪大 基理<sup>A</sup>, 田淵 豊<sup>A</sup>, 北川 勝浩<sup>A</sup>

Numerical generation of dynamical decoupling sequences

Osaka Univ., Yutaka Tabuchi, Masahiro Kitagawa

動的デカップリング法[1]は、分光によって環境の情報を得ることができない量子ビットの緩和を抑制する有効な手法であり、近年量子メモリや量子計算の実現に向けて様々なパルス列の開発が盛んに行われている。その一方で、パルスの有限幅効果や帯域幅制限などを柔軟に取り込むことができる、非線形計画問題を用いた量子状態制御法も提案されている[2]。

本研究では動的デカップリング波形の“数値的な生成法”を提案する。数値最適化を行うことでパルス幅や帯域幅制限等の実験的な制約を動的デカップリング法に取り込むことができる。最適化コスト関数の計算には、動的デカップリングパルスの構成で用いられている平均ハミルトニアン法[3]を適用し、そのパルスシーケンスの適合度を評価する。

系のハミルトニアンを  $\hat{H}_0$  とする。正規化直交エルミート演算子の集合  $\{\hat{\Theta}_\alpha | \text{Tr}[\hat{\Theta}_\alpha \hat{\Theta}_\beta] = \delta_{\alpha\beta}\}$  を用いて系のハミルトニアン  $\hat{H}_0$  を展開し、その係数を  $h_\alpha$  とすると  $\hat{H}_0 = \sum_\alpha h_\alpha \hat{\Theta}_\alpha$  のように展開できる。ユニタリ演算子  $\hat{U}_V(t) = \hat{T} \exp(i \int_0^t \hat{V}(t') dt')$  を用いて、 $\hat{H}_0$  を制御ハミルトニアン  $\hat{V}(t)$  で相互作用表示すると

$$\hat{\tilde{H}}_0(t) = \hat{U}_V(t) \hat{H}_0 \hat{U}_V^\dagger(t) = \sum_\alpha h_\alpha \left( \sum_\beta c_{\beta\alpha}(t) \hat{\Theta}_\beta \right) \quad (1)$$

となる。ここで  $c_{\beta\alpha}(t)$  は  $\hat{U}_V(t) \hat{\Theta}_\alpha \hat{U}_V^\dagger(t) = \sum_\beta c_{\beta\alpha}(t) \hat{\Theta}_\beta$  となる展開係数である。ここで  $\hat{\tilde{H}}_0(t)$  に対して  $T$ -周期性を仮定し、その平均ハミルトニアン  $\bar{H}_{\text{eff}}^{(0)} = \sum_{\alpha,\beta} h_\alpha \left( T^{-1} \int_0^T c_{\beta\alpha}(t) dt \right) \hat{\Theta}_\beta$  が零になるような制御ハミルトニアンを見つけることができればその系はストロゴ的に時間発展が止まることになる。この平均ハミルトニアンに対して  $\Phi^{(0)} = T^{-1} \sum_{\alpha,\beta} \left| \int_0^T c_{\beta\alpha}(t) dt \right|^2$  というコスト関数を定義し、非線形計画問題  $\min_{c_{\beta\alpha}(t)} \Phi^{(0)}$  subjected to  $c_{\beta\alpha}(t) = c_{\beta\alpha}(t-T)$  を数値的に実行することで、動的デカップリング波形を得ることができる。

本発表では、例題として環境との結合によって生じる量子ビットの位相緩和を抑制し、さらに実験装置によって生じるパルスの系統誤差に耐性のあるパルスシーケンスを生成し評価する。

## 参考文献

[1] L. Viola, E. Knill, and S. Lloyd *Phys. Rev. Lett* 82, 2417 (1999).

[2] N. Khaneja, T. Reiss, C. Kehlet, T. Schulte-Herbrüggen, and S. J. Glaser *J. Magn. Reson.* 172, 296-305 (2005).

[3] U. Haebleren and J. S. Waugh *Phys. Rev.* 175, 453-467 (1968).