بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تأثیر ترازهای انرژی مختلف در تولید تک فوتون های نشری الماس حاوی نیتروژن- تهی جای

آزاده احمدیان، رسول ملک فر

دانشگاه تربیت مدرس – دانشکده علوم پایه- بخش فیزیک – گروه فیزیک اتمی و مولکولی

تهران- صندوق پستی ۱۷۵-۱۴۱۱۵

چکیده – تک فوتون ها به دلیل کاربردشان در مخابرات کوانتومی و همچنین کاربردهای مفاهیم پایه کوانتوم مورد مطالعه و تحقیق بسیاری می باشند. در این راستا اعمال تغییرات در تک فوتونهای منتشر شده از آن، اهمیت خاصی دارد. در این مقاله سیستم الماس حاوی مراکز رنگی *NV center* به عنوان منبع تولید تک فوتون در نظر گرفته شده است و با توجه به روشهای موجود جهت قرار دادن ترازهای مورد نظر در حالت تاریک، نشان داده می شود که تأثیر آن بر روی تک فوتونهای نشری به صورت بهبود منبع تک فوتونی بودن آشکار خواهد شد. بدین منظور از تابع درجه ۲ همدوسی استفاده شده است و مشاهده می‌شود که مقدار آن کاهش خواهد یافت.

کلید واژه- تک فوتون- الماس حاوی NV- تابع درجه ۲ همدوسی- ترازهای انرژی

The Impact of Different Energy Levels in the Production of Single Photons Emitted from Nitrogen Vacancy Diamond

Azadeh Ahmadian, Rasoul Malekfar

Atomic and Molecular Group, Department, of Physics, Faculty of Basic Sciences,
Tarbiat Modares University, P.O. Box 14115-175, Tehran, I.R. Iran

Abstract: Single photons are under study and research because of their application in quantum communication and also in fundamental issues of quantum physics. Considering this fact, imposing changes in the emitted photon is of great importance. In this paper, NV (Nitrogen vacancy) diamond system has been chosen as single photon source and by applying the existing methods for being the related levels in dark state, it has shown that the effect on the emitted photon can be regarded as an improvement for the single photon source. For this aim, second order coherency function is used and it is observed that its value will be decreased.

Keywords: Single Photon- NV Diamond – The second Coherency Function – Energy Levels

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-05-29]

۱- مقدمه

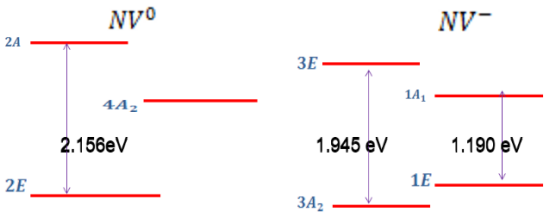
مشاهده بسته‌ای (کوانتومی) بودن امواج نور، که فوتون نامیده شد، از مواردی بود که محققان را به سمت تئوری کوانتوم هدایت کرد. هر چند مشاهده فوتونها به صورت مجزا از هم تا سالهای اخیر ممکن نشده بود ولی تحقیقات گویای وجود آنها بود.[۱-۴] در سالهای اخیر منابع نور کوانتومی یا به عبارتی منابعی که برای توصیف آنها ناچار به استفاده از نظریه مکانیک کوانتومی می باشد، مورد مطالعه وسیع قرار گرفتند. عمده منابع کوانتومی مورد تحقیق که در مخابرات کوانتومی نیز استفاده خواهد شد، منابع تک فوتون و در هم تنیده می‌باشند که تمرکز ما در این تحقیق بر روی منابع تک فوتون است. منابع تک فوتون منابعی هستند که فوتونها را به صورت مجزا ساطع می‌کنند بدین معنی که اطلاعات یک فوتون در فوتون دیگر تأثیر ندارد. وجود این منابع کاملاً مشاهده شده است و هم اکنون مطالعه بر روی کاربردی بودن این منابع تحقیق می‌شود، به طور مثال طول موجهای تک فوتونها در محدوده پنجره اپتیکی باشند، یا قابلیت صنعتی شدن و یا کاربری در دمای محیط را دارا باشند همچنین نحوه اعمال تغییرات در این نوع منابع نور کوانتومی، مورد تحقیق و توجه بسیاری از فیزیکدانان قرار گرفته است.

در این مقاله ضمن مطالعه ترازهای انرژی اتم الماس حاوی مراکز رنگی و نحوه بررسی جذب ونشر، تأثیر در ترازها نیز بررسی خواهد شد. بدین منظور از روش تله انداختن همدوس ترازها، EIT برای اتم الماس با نیتروژن تهی جای توصیف خواهد شد. انگیزه از انتخاب این روش، این است که می توان با استفاده از این روش، پهنای جذب را تغییر داد و به نحوی ابزار کنترلی وجود دارد هر چند این روش به دلیل اینکه توان عبور پهنای باند بسیار باریک را دارد می‌تواند در ابزارهای با حساسیت بالا، از جمله ابزارهای سنجش استفاده شود. مدلسازی این روش برای یک نقطه کوانتومی Quantum Dot در سالهای قبل انجام شده است[5]

۲- ترازهای انرژی

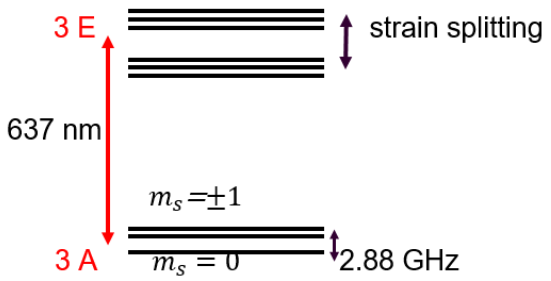
۲-۱ اتم کربن نیتروژن –تهی جای

ترازهای الکترونیکی الماس نیتروژن- تهی جای مورد بررسی و مناقشه بسیاری است ولی آنچه که مورد توافق بیشتری است در ذیل نمایش داده شد. فاصله انرژی آنها از چپ به راست به ترتیب ۱,۹۴۵، ۱,۱۹۰ و ۲,۱۵۶ الکترون ولت است،



شکل ۱- ترازهای انرژی NV باردار در مقابل NV خنثی، ترازهای سمت چپ نشاندهنده حالت سه گانه S=1 می باشند.

حالات خنثی و بار منفی هر دو حالاتی هستند که نیتروژن – تهی جای می تواند در این شرایط قرار گیرند و در صورتی که در این شرایط باشند دارای ترازهای انرژی متمایزی خواهند بود هرچند بیشتر مواقع -- NV مشاهده خواهد شد. در حالت -- NV سیستم دارای تراز پایه و برانگیخته سه گانه S=1 است که درشرایطی که میدان الکتریکی، مغناطیسی و استرس وارد شود این ترازها تغییر می‌یابند. در صورتی که میدان مغناطیسی وارد نشود تراز s= -1, 1 بر روی هم منطبق هستند و تراز s=0 مجزا است در حالت برانگیخته نیز در صورت عدم حضور استرس و میدان مغناطیسی هر سه حالت سه گانه بر روی هم منطبق هستند که شکل ذیل، می تواند این ترازها را توصیف کند.



شکل ۲- ترازهای انرژی NV diamond، شکل نشاندهنده است که سیستم میتواند به صورت ۳ ترازی در نظر گرفته شود.

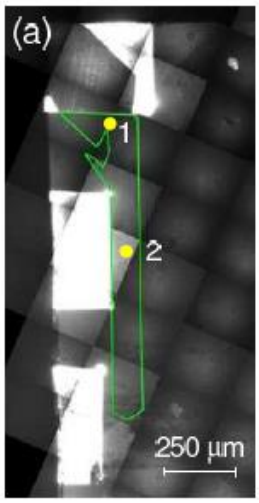
۲-۲ تحریک ترازهای مورد آزمایش

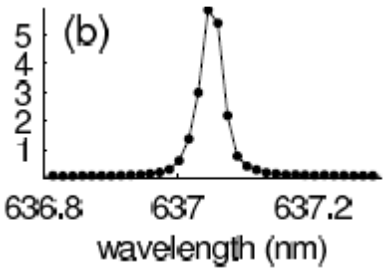
سال ۲۰۰۶ با استفاده از تله انداختن همدوس از الماس دارای NV سیستم EIT را تولید کردند [6] و با این سیستم کاهش در طیف فتولومینسنس را مشاهده کردند. همچنانکه می دانیم EIT که در واقع یک نوع به تله انداختن همدوس است،ابزاری

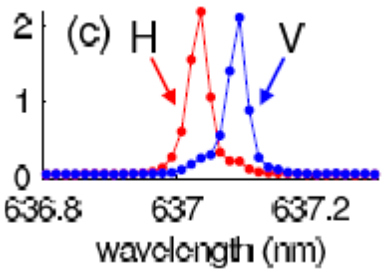
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-05-29]

برای کاهش بازه جذب یک بیم جستجوگر Probe می باشد. دلیل آن وجود یک لیزر دمشی Pump بسیار قوی در محیط است[7]. میزان باریکی طیف جذب، به پارامترهای آزمایش بستگی دارد و به پهنای اصلی اتم وابسته نیست. در این روش از دو لیزر استفاده می شود یکی مربوط به پمپ و دیگری کاوشگر. پمپ شدت بسیار قویی دارد و کاوشگر ضعیف و همچنین هر دو را به صورت همدوس به سیستم اتمی سه ترازه وارد می کنیم. ترکیب این دو لیزر باعث می شود تا حالت ۳ یا همان حالت برانگیخته در وضعیت تاریک قرار گیرد. می‌توان نشان داد که با تحول زمانی، احتمال حضور سامانه در حالت برانگیخته صفر خواهد بود بنابراین سامانه در برهمنهشی از حالات ۱ و ۲ قرار دارد. این شرایط برای ذخیره اطلاعات بسیار کاربرد دارد. این شرایط را با سیستمی که فاصله بین ترازهای پایه آن GHz ۲٫۸۸ می باشد آزمایش نمودند. بدین منظور لیزر هایی که در این سیستمها بکار رفت را نیز با فاصله GHz ۲٫۸۸ درنظر گرفته و آزمایش را انجام دادند لازم به ذکر است که یکی از این ترازها مربوط به حالت اسپین صفر و دیگری حالت اسپین یک می‌باشد







شکل ۳- بلور الماس تحت دو لیزر ۵۳۲ nm در دو مکان (قطبیده و غیر قطبیده) a) مکان لیزرها، b) طیف فوتو لومینسنس حاصل از نور غیر قطبیده، c) طیف فوتولومینسنس حاصل از دو نور قطبیده افقی و عمودی،

چنانکه از این شکل بر می آید مشاهده می کنیم که کاملاً طیف آنها از هم مجزا هستند که با آنچه که در آزمایشهای آتی مشاهده شد سازگار است، (تابشهای ترازهای مختلف به قطبش وابسته است). نقاط ۱ و ۲ در شکل a محل تابش این دو لیزر است، ۱ لیزر غیر قطبیده و ۲ لیزر قطبیده. لازم به ذکر است کشش (strain) در جابجایی تراز نقش مؤثری دارد و البته ترازهای پایه نیز به اسپین وابسته هستند. لازم به ذکر است در مرجع دیگری [8] نتایج آزمایش با الماسی که دارای تعداد کمی مراکز رنگی است و می توان آثار تک فوتونی را در آن مشاهده کرد ارائه شد.

حال درصورتیکه شدت فرکانس رابی که در اثر دمش بوجود می آید از کاوشگر کمتر باشد آنگاه می توان نشان داد که سیستم به صورت ذیل تغییر می یابد. [7,9]

$$\Omega_1 \ll \Omega_2 \xrightarrow{yields} ,|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(-|a\rangle + |c\rangle) , |\psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|a\rangle + |c\rangle) \quad |\psi_3\rangle = |b\rangle \qquad (۱)$$

از نتایج مشاهده می کنیم که دو تراز اول به صورت ترکیبی از ترازهای قبلی است اگر تحول زمانی سامانه را در نظربگیریم مشاهده می کنیم با گذر زمان تنها حالات ۱ و ۲ باقی می ماند.

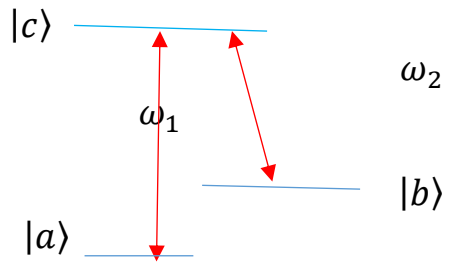
۳- اعمال تغییرات در فوتونهای نشری

تحقیق انجام شده در این مقاله، مربوط به تأثیر تولید یک EIT الماس با مراکز رنگی در تک فوتونهای نشری آن است حال نشان می دهیم که در این نوع الماس اگر شرایط EIT

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-05-29]

را وارد کنیم می توانیم تعداد ترازهای برانگیخته را کمتر و در واقع یک سیستم تک فوتونی بهتری داشته باشیم. بدین منظور سیستم NV را به صورت سه ترازی و تحت دو فرکانس کاوشگر و پمپ در نظر می گیریم.



شکل ۴: اتم سه ترازه که تحت دو فرکانس دمش و کاوشگر قرار گرفته است و با این شرایط می توان به یک EIT دست یافت.

از ضرایب انیشتین می دانیم که

$$\frac{1}{\tau_i} = A_{\mathrm{cb}} + A_{\mathrm{ac}} + \rho(\nu_{\mathrm{ca}})B_{\mathrm{ca}} + \rho(\nu_{\mathrm{cb}})B_{\mathrm{cb}} + other\ transition \qquad (۲)$$

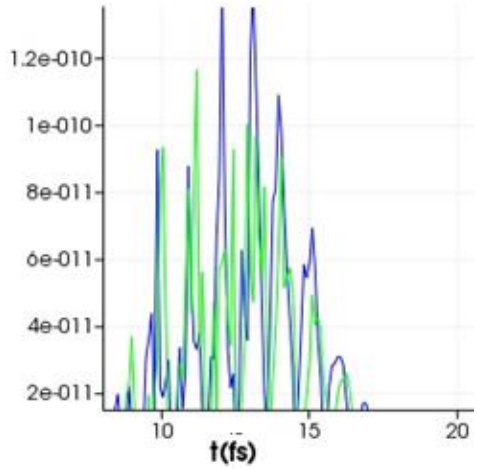
حال فرض می کنیم که در سامانه اتمی بالا تراز اتمی ۳ حذف شود آنگاه Aac و Bac و Acb و Bcb نیز در رابطه زمان عمر وجود ندارد و در واقع این رابطه به

$$\frac{1}{\tau_i} = other\ transition \qquad (۳)$$

کاهش می یابد یعنی زمان عمر افزایش می یابد. افزایش زمان عمر به این معناست که $g^2(t)$ کاهش می یابد بدین منظور از رابطه تابع درجه ۲ همدوسی و زمان عمر استفاده می کنیم

$$g^2(\tau) = 1 - \exp\left(-\frac{3\gamma}{4}\tau\right) Cos\Omega\tau \qquad (۴)$$

در این حالت Ω فرکانس رابی است و τ نیز زمان عمر است. از آنجاییکه مقدار این تابع نشاندهنده میزان تک فوتونی بودن آن است (مقادیر $g^2(t)$ کمتر از ۰,۵ ی نشاندهنده تک فوتون بودن است)، لذا در صورت کاهش آن به منبع بهتری دست یافتیم. لازم به ذکر است مقادیر اندازه گیری شده این تابع برای NV Diamond حدود ۰,۰۷ است [10]. نتایج این تغییرات نسبت به حالت عادی را می توان در شکلهای ذیل مشاهده کرد.



شکل۵: با تغییرات اعمال شده در تاریک ساختن ترازها می توان مقدار تابع $g^2(t)$ را تغییر داد این میزان کاهش حدود ۰,۹۲ مقدار اولیه است. خطوط آبی مقدار اولیه و خطوط سبز پس از اعمال شرایط EIT است.

۴- نتیجه گیری

کاهش تابع $g^2(t)$ به معنای سوق یافتن به سمت منبعی است که تک فوتونی بودن آن احتمال بیشتری دارد. یعنی با احتمال بیشتری حالت $|n=1\rangle$ را ساطع می کند. از آنجاییکه این منابع در امنیت انتقال اطلاعات در مخابرات کوانتومی نقش مؤثری دارند، لذا می توان از این روش برای بالا بردن امنیت در شبکه های کوانتومی استفاده نمود.

مراجع

[1] K.Night. Quantum Optics. Cambridge, 2006.
[2] D.F.Walls, G.J. Milburn, Quantum Optics. 1994.
[3] Barnet. *Quantum Information.* Oxford, 2009.
[4] M.Nielsen, and I.Chaung, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge, 2010.
[5] P.Zoller, H.J.Kimble,H.Mabuchi. J.I.Cirac, "Quantum State Transfer and Entanglement Distribution among Distant Nodes in a Quantum Network." PRL, pp. 3221-3224, 1997.
[6] C.Santori, et al. "Coherent population trapping in diamond N-V centers at zero magnetic field", OSA, Vol. 14, 2006.
[7] S.Zubairy and M.Sculley Quantum Optics. Cambridge, 1997.
[8] V.M. Acosta, K. Jenson, C. Santori, D.Budker, R.G.Beausoleil",Electromagnetically-Induced transparency in a diamond spin ensemble enables all-optical electromagnetic field sensing, PRl, Vol. 110 , 2013
[9] G.T.Purves, Absorption and Dispersion in Atomic Vapoures: Applications to interferometery. 2006.
[10] M.W. Doherty et al. "Nitrogen Vacancy Color Center in Diamond", arXive 1302.3288 v.1, Elsevier, 2013.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-05-29]