توليد نور غير كلاسيك از نقطه‌هاي كوانتومي

Generation of Non-Classical Light from Quantum Dots

مسعود شاهمرادي- رسول ركني‌زاده
گروه پژوهشي اپتيك كوانتومي- دانشگاه اصفهان

چكيده: در اين مقاله نشان داده‌ايم كه مي‌توان از حصر كولني در نيمه‌رساناهايي با پيوند ناهمگن براي ايجاد همبستگي بين تونل زني تك بار و گسيل تك فوتون استفاده كرد. در اين‌گونه ساختارها انرژي تزريق تك الكترون بايد بيشتر از پهناي زير باند تشديدي و انرژي مشخصه‌ي افت و خيزهاي گرمايي باشد تا اين اثرات مشاهده شود.

با توجه به رشد رايانه‌هاي كوانتومي و فناوري مخابرات راه دور، نياز به توسعه منابع نور غير كلاسيك بيش از پيش احساس مي‌شود. نياز به انتقال داده‌ها با نرخ بالاتر فناوري‌هاي حاضر را به زودي به حدي مي‌رساند كه يك بيت اطلاعات را فقط چند فوتون حمل مي‌كنند و اين هم‌مرتبه با نوفه كوانتومي ذاتي براي منابع نور كلاسيك است. به همين منظور توليد و آماده سازي و بررسي رفتار نورهاي غير كلاسيك امروزه حجم عمده‌اي از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است.

براي نورهاي غير كلاسيك تابع **همدوسي مرتبه دوم** [۱] براي تأخير زماني صفر مي‌تواند در بازه زير قرار بگيرد

$$1 \geq g^2(0) \geq 0 \qquad (۱)$$

در حالي كه در موارد كاملاً كلاسيكي فقط $g^2(0) \geq 1$ است و حالت هايي از ميدان كه $g^2(0)$ آن‌ها بين صفر و يك باشد را حالت‌هاي غير كلاسيك مي‌ناميم كه مانسته‌ي كلاسيك ندارد.

براي توليد نورهاي غير كلاسيك عمدتاً از ساختارهاي ماده چگال استفاده مي‌شود. به ويژه اين كه كنترل رشد و توليد نانوساختارهاي نيم‌رسانا (نقطه‌هاي كوانتومي) به صورت اتم‌هاي مصنوعي امكان توليد حالت‌هاي كوانتومي و به خصوص تك فوتون را فراهم نموده‌اند.

در يك پيوندگاه $p-i-n$ رژيم «**حصر كولني**» عبارت است از بازه پارامتري كه در آن انرژي تونل زني تك الكترون (e^2/C_d) (كه در اينجا C_d ظرفيت پيوندگاه است) از ساير انرژي‌هاي مشخصه سيستم بيشتر مي‌شود. به طور مثال اين انرژي در اين رژيم بايد از انرژي مشخصه افت و خيزهاي گرمايي (kT) و يا پهن شدگي انرژي فرآيند تونل‌زني خود الكترون $(t\Gamma_t)$ بيشتر شود. وابستگي تابعي انرژي پيوند به ولتاژ پيوند $E=1/2C_dV_j^2$ است كه V_j ولتاژ پيوند گاه است. براي $V_j=0$، رويداد تونل‌زني نمي‌تواند رخ دهد. از طرف ديگر چون تغييرات انرژي در نتيجه تونل‌زني برابر $\Delta E=e^2/C_d$ است و اين انرژي را در رژيم حصر كولني نمي‌توان با هيچ منبع ديگري فراهم كرد از اين‌رو فقط وقتي كه V_j بزرگتر از $e^2/(2C_d)$ است، ما انتظار ديدن رويداد تونل‌زني را داريم. اما به دنبال اولين تونل زني، رويداد تونل‌زني دوم براي پنجره زماني $\tau=e/I$، ممنوع خواهد بود، در نتيجه تك الكترون در هر بازه زماني منظم τ تزريق مي‌شود. اين امر باعث همبستگي بين رويدادهاي تزريق الكترون پي‌درپي مي‌شود. اما به دليل مشكلات آزمايشگاهي [۲] اثر حصر كولني در پيوندگاه‌هايي با يك سد قابل مشاهده نيست و به همين منظور از ساختارهايي چون $p-i_p-i-i_n-n$ (GaAs-AlGaAs) استفاده مي‌شود. از آن‌جايي كه ما به دنبال آمار زيرپوآسوني براي تزريق الكترون‌ها هستيم (كه نتيجه آن توليد فوتون‌هايي با آمار زير پوآسوني است) نياز به پيوندگاه‌هايي با

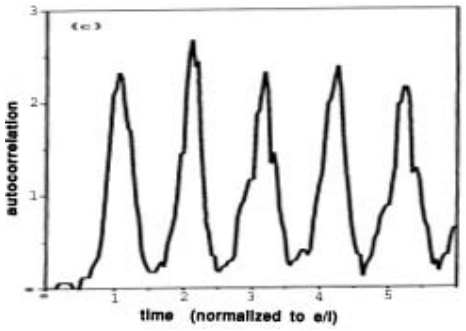
سطح مؤثر بسيار كوچك داريم [۳]. اگر ولتاژ پيوندگاه $V_j(t)$ به مقدار كافي زير پتانسيل ساختاري (built-in) باشد $(V_{bi}-V_j(t)>>kT)$، انتقال حاملها در چنين ساختاري توسط تونلزني الكترونها و حفره ها از نواحي نيالوده لايه هاي سدي i_p و i_n AlGaAs ، رخ مي‌دهد و الكترون و حفره تزريق شده به صورت تابشي در لايه i-GaAs تركيب مي‌شوند. فرض مي‌كنيم عرض چاه كوانتومي i-GaAs به اندازه اي كوچك باشد (از مرتبه ده آنگستروم) كه جداشدگي باندهاي انرژي چاه كوانتومي به اندازه كافي از انرژي تزريق الكترون (حفره) به درون جزيره كولني GaAs بيشتر باشد، آنگاه در تونلزني تشديدي فقط يك زير نوار رسانش(ظرفيت) شركت مي‌نمايد. تونلزني تشديدي يك الكترون و يا حفره تنها وقتي كه ولتاژ پيوندگاه به فرم زير باشد مجاز است:

$$E_{fh}-\frac{e^2}{2C_{ni}}\geq E_{res,e}\geq E_{nc}-\frac{e^2}{2C_{ni}} \qquad \text{الكترون ها} \qquad (۲)$$

$$E_{fp}+\frac{e^2}{2C_{pi}}\leq E_{res,h}\leq E_{pv}+\frac{e^2}{2C_{pi}} \qquad \text{حفره ها} \qquad (۳)$$

در اين جا $E_{res,e}(E_{res,h})$ انرژي زير نوار تشديدي الكترون (حفره) در چاه كوانتومي GaAs ، E_{nc} و E_{pv} انرژي باند هاي رسانش و ظرفيت در لايه هاي n و p ، E_{fn} و E_{fp} انرژي هاي شبه فرمي در لايه هاي مربوطه و C_{ni} ، C_{pi} ظرفيت ناحيه هاي $n-i_n-i$ و $p-i_p-i$ هستند.

در چنين ساختاري در دماي بسيار پايين در مد عملياتي جريان ثابت، نوسان منظم ولتاژ پيوندگاه و جريان منظم تك فوتون توليد مي‌شود و در مد عملياتي ولتاژ ثابت اگر چه رويدادهاي تونلزني منفرد، خيلي منظم نيست لكن گسيل فوتوني و رويدادهاي تونلزني تشديدي، قوياً همبسته هستند [۴]. در شكل (۱) نمودار خودهمبستگي براي مد عملياتي جريان ثابت ارائه شده است همانطور كه مشخص است فوتون‌هاي توليد شده در اين مد پادگروهه و زير پوآسوني هستند، خواصي كه نمي‌توان توسط نظريه هاي نيمه‌كلاسيك آن‌ها را توضيح داد.



شكل (۱)

منابع و مراجع:

[1] R.Loudon, The Quantum Theory of light (oxford, 1983).
[2] M.H.Devoret, D.Esteve, H.Grabert, G.L.Ingold, H.Pothier and C.Urbina, Phys. Rev. Lett. **64**, 1824 (1990).
[3] A.Imamoghlu and Y.Yamamoto, Phys. Rev. Lett. **70**, 3327 (1993).
[4] A.Imamoghlu and Y.Yamamoto, Phys. Rev. B. **46**, 15982 (1992).