

Verschränkte Photonen aus Halbleitern für die Quanteninformation

Vortrag zum Seminar „Optik/Photonik“

Robert Riemann

Institut für Physik der Humboldt-Universität zu Berlin

30. Mai 2011



1 Einführung

- Motivation
- Erzeugung verschränkter Teilchen
- Reine und Gemischte Qubit-Zustände

2 Dichteoperator

- Definition
- Messung

3 Realisierung im Halbleiter

- Exzitonen im Halbleiter
- Implementierung mit Halbleitern

4 Ausblick

- Zusammenfassung

Phänomen Quantenverschränkung

Bedeutung

Verschränkte Teilchen dürfen nicht mehr unabhängig voneinander beschrieben werden (keine Faktorisierung von $|\phi\rangle$), sondern müssen als Gesamtsystem behandelt werden.

Geschichte

- 1925: grundlegende Konzepte (Heisenberg, Schrödinger, ...)
- 1935: EPR-Paradoxon
(Stichworte: Fernwirkung, Realität & Lokalität)
- 1964: Bell'sche Ungleichungen
- 1967: C. A. Kocher und E. Commins weisen Verletzung der Bell'schen Ungleichungen nach
↔ Quantenphänomene klassisch nicht beschreibbar
- seit über 50 Jahren unstrittig und vielfach angewandt in Festkörperphysik, Teilchenphysik, Optik, ...

Anwendungsgebiete von verschränkten Teilchen

- Quantensimulatoren und Quantencomputer:
Simultane Anwendung von Rechenoperationen durch verschränkte Zustände
- Quantenkryptographie:
Protokolle verwenden u.a. polarisationsverschränkte Photonen
- Quantenteleportation:
Übertragung von Eigenschaften (z.B. Polarisation)

Parametrische Fluoreszenz

- Nicht-Lineare Optik erlaubt mittels Parametrischer Fluoreszenz die Erzeugung zweier Photonen aus einem Pump-Photon
- Dominantes Verfahren zur Erzeugung von einzelnen Photonen bzw. Photonenpaaren
- Verschränkung der Polarisation falls Photonen entlang der Kegelschnitte emittiert werden

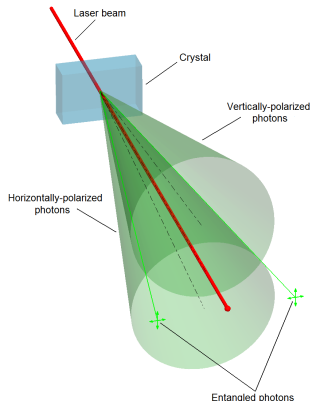


Abbildung: Parametrische Fluoreszenz [wikipedia]

Beispiel für Zustände (hier Polarisation von Photonen)

Gemischter Zustand

$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle|0\rangle + |0\rangle|1\rangle)$$

- nicht faktorisiert
- maximal verschränkt

Reiner Zustand

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2}(|1\rangle|0\rangle + |1\rangle|0\rangle) = |1\rangle|0\rangle$$

- faktorisiert
- unverschränkt, klassisch (wegen Unterscheidbarkeit)

Gliederung

- 1 Einführung
 - Motivation
 - Erzeugung verschränkter Teilchen
 - Reine und Gemischte Qubit-Zustände
- 2 Dichteoperator
 - Definition
 - Messung
- 3 Realisierung im Halbleiter
 - Exzitonen im Halbleiter
 - Implementierung mit Halbleitern
- 4 Ausblick
 - Zusammenfassung

Definition des Dichteoperators

Der Dichteoperator enthält die vollständige Beschreibung der Wahrscheinlichkeiten p_i , dass sich ein Quantenzustand im reinen Zustand $|\psi_i\rangle$ befindet.

Definition

$$\hat{\rho} = \sum_i p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i| = \sum_i p_i \mathbb{P}_{\psi_i} \quad \text{mit Projektor } \mathbb{P}_{\psi_i} = |\psi_i\rangle \langle \psi_i|$$

Eigenschaften:

- positiv semidefinit
- hermitesch \rightarrow reelle Eigenwerte
- diagonal in Eigenbasis, ansonsten diagonalisierbar

Messen des Dichteoperators

- Stokes: 4 Messungen notwendig um Dichtematrix eines 2-Level-Systems zu bestimmen
- Satz der Messungen uneindeutig: mehrere Möglichkeiten, z. B.
 - Filter mit 50 % Durchlässigkeit
 - horizontaler Polarisationsfilter
 - diagonaler Polarisationsfilter
 - zirkularer Polarisationsfilter

Messen des Dichteoperators für ein Qubit

Definition

Stokes Parameter:

$$S_0 = N(\langle R|\hat{\rho}|R\rangle + \langle L|\hat{\rho}|L\rangle)$$

$$S_1 = N(\langle R|\hat{\rho}|L\rangle + \langle L|\hat{\rho}|R\rangle)$$

$$S_2 = N(\langle R|\hat{\rho}|L\rangle - \langle L|\hat{\rho}|R\rangle)$$

$$S_3 = N(\langle R|\hat{\rho}|R\rangle - \langle L|\hat{\rho}|L\rangle)$$

Definition

$$\hat{\rho} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^3 \frac{S_i}{S_0} \hat{\sigma}_i$$

Messen des Dichteoperator für zwei Qubits

Definition

$$\hat{\rho} = \frac{1}{2^2} \sum_{i_1, i_2=0}^3 r_{i_1, i_2} \cdot \hat{\sigma}_{i_1} \otimes \hat{\sigma}_{i_2}$$

- r_{i_1, i_2} äquivalente Größe zu S_j
($r_{0,0} = 1$)
- Anzahl der Parameter r_{i_1, i_2} : $4^2 - 1$
- Gesamtphotonenanzahl zur Normierung a priori unbekannt:
Gesamtanzahl ist weiterer Messparameter
↪ 16 freie Parameter zu messen

Gliederung

- 1 Einführung
 - Motivation
 - Erzeugung verschränkter Teilchen
 - Reine und Gemischte Qubit-Zustände
- 2 Dichteoperator
 - Definition
 - Messung
- 3 Realisierung im Halbleiter
 - Exzitonen im Halbleiter
 - Implementierung mit Halbleitern
- 4 Ausblick
 - Zusammenfassung

Exziton und Biexziton

Definition

Ein *Exziton* ist ein gebundener Zustand aus Elektron und Loch im Halbleiter.

- Analogie: Wasserstoff-Atom
- Anregung zum Beispiel durch Lichtabsorbtion
- *Biexzitonen* sind analog zum H_2 -Atom Bindungszustände aus 2 Exzitonen
- Exziton-Biexziton-Systeme sind mittels eines 4-Level-Systems beschreibbar

Energie-Niveaus

- 4 Zustände:
 - $|00\rangle$ Grundzustand (G)
 - $|01\rangle, |10\rangle$ orthogonale, einfach-angeregte Zustände (X)
 - $|11\rangle$, doppelt-angeregter Zustand (XX)
- $|11\rangle$ zerfällt unter Abstrahlung zweier Photonen in $|11\rangle$
- Polarisation der Photonen maximal verschränkt, falls X-Zustände gleiches Energie-Niveau haben

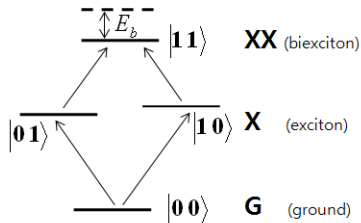


Abbildung: Biexziton [wikipedia]

Quantenpunkte

- Typischerweise aus $\mathcal{O}(10^4)$ Atomen
- Ausdehnung $\mathcal{O}(10 \text{ nm})$
- Trägerhalbleiter wird mit Halbleiter anderer Gitterkonstante bedampft
↔ Energieminimierung durch Zusammenziehen zu einem Quantenpunkt
- Einschränkung der Bewegungsfreiheit von Exzitonen:
 - diskretes Energiespektrum
 - Ausbildung von Biexzitonen

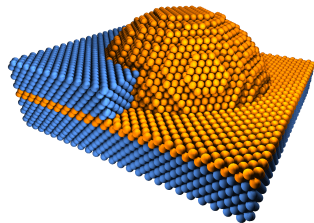


Abbildung: Quantenpunkt
[www.fotonik.dtu.dk]

Dichtematrix optisch angeregter Quantenpunkte

- Klassisches Licht (keine Verschränkung):
nur Diagonalelemente in Dichtematrix
- Verschränktes Licht
 - maximal falls $S = 0$ eV (Feinstrukturaufspaltung)
 - Einträge bei $|VV\rangle\langle HH|$ bzw. $|HH\rangle\langle VV|$

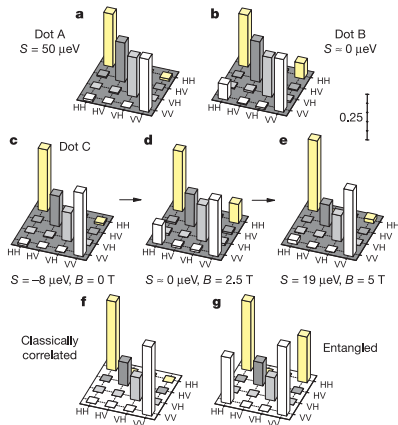


Abbildung: Dichtematrix [Nature 439, 179-182 (2006)]

Elektrische Anregung von Quantenpunkten I

- wie p-n-Diode, aber mit intrinsischer (i) Zwischenschicht, in die Quantenpunkte (QP) eingebettet sind
- Elektronen und Löcher fallen auf Grund der Potentialdifferenz in QP
- Bildung von Biexzitonen
- Zerstrahlung in verschränktes Photonenpaar $|\psi^+\rangle$

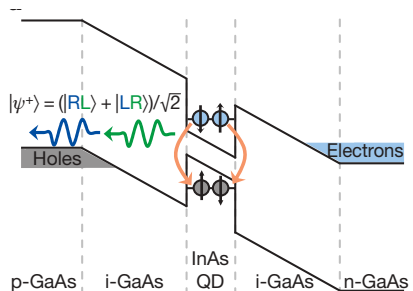


Abbildung: Halbleiterstruktur
[Nature 465, 594–597 (2010)]

Elektrische Angerung von Quantenpunkten II

- Korrelationsfunktion $g^{(2)}$ beschreibt die Korrelation der Photonenzahl 2er Lichtströme in Abhängigkeit ihrer Zeitdiff. τ
- Trennung des Diodenlichtes mittels Strahlteiler
- Nachschaltung von verschiedenen Polarisatoren: XX und X gleich (schwarz) oder orthogonal (rot)

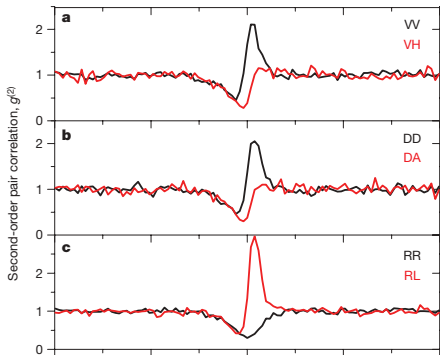


Abbildung: Korrelationsfunktionen $g_{XX,X}^{(2)}$ [Nature 465, 594–597 (2010)]

Fidelity

Definition

$$\begin{aligned} f^+(|\phi\rangle) &= |\mathbb{P}_{\psi^+} |\phi\rangle|^2 \\ &= \frac{1}{4}(1 + C_{\text{rectilinear}} + C_{\text{diagonal}} + C_{\text{circular}}) \end{aligned}$$

- mit

$$C(\tau) = \frac{g_{XX,X}^{(2)}(\tau) - g_{XX,\bar{X}}^{(2)}(\tau)}{g_{XX,X}^{(2)}(\tau) + g_{XX,\bar{X}}^{(2)}(\tau)}$$

- bei 0.50: maximale klassische Korrelationz
- bei 0.25: unkorreliertes Licht

Ergebniss für die Fidelity

- Maximum bei:
 0.785 ± 0.022

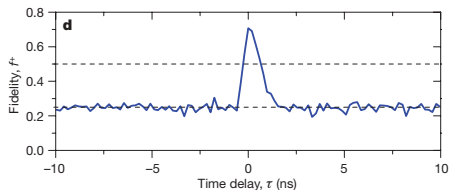


Abbildung: Verschränkung Fidelity f^+
[Nature 465, 594–597 (2010)]

Gliederung





- 1 Einführung
 - Motivation
 - Erzeugung verschränkter Teilchen
 - Reine und Gemischte Qubit-Zustände
- 2 Dichteoperator
 - Definition
 - Messung
- 3 Realisierung im Halbleiter
 - Exzitonen im Halbleiter
 - Implementierung mit Halbleitern
- 4 **Ausblick**
 - **Zusammenfassung**

Probleme

- Preparation der Quantenpunkt sehr aufwendig:
sehr wenige, symmetrische, kleine Punkte ist das Ziel
- Verhinderung der Feinstrukturaufspaltung
- Anzahl an unverschränkten Photonen weit größer:
akurate Trennung von Signal und Untergrund notwendig
- Finden eines geeigneten Maßes für Verschränkung
(auch für mehr als zwei Teilchen)
- Messen des Dichteoperators:
ungenauere Messungen führen zu komplexen Anteilen
- Quantenpunkte in anderen Zuständen als dem
Biexziton-System stören Korrelationsmessung

Bisherige Ergebnisse und Ausblick

- bisher
 - Erzeugung von verschränkten Photonen in Halbleitern mittels optischer und elektrischer Anregung
- Ziel
 - Steigerung der Reinheit und Effizienz bis hin zur Erzeugung eines einzelnen verschränkten Photonenpaares
 - Verschränkung mehrerer Photonen

-  [James et al.] On Measurement Of Qubits
D. James et al., Phys. Rev. A 64, 05/2312 (2001)
-  [Stevenson et al.] A semiconductor source of triggered entangled photon pairs
R. M. Stevenson et al., Nature 439, 179-182 (2006)
-  [Salter et al.] An entangled-light-emitting diode
C. L. Salter et al., Nature 465, 594–597 (2010)
-  [Wootters et al.] Entanglement of Formation of an Arbitrary State of Two Qubits
W. K. Wootters et al., Phys. Rev. Lett. 80, 2245-2248 (1998)

Jüngste Ereignisse

- Anton Zeilinger: neben der Lokalität muss auch die Realität aufgegeben werden
- Fernwirkung: untere Grenze der Schwindigkeit bei 10.000facher Lichtgeschwindigkeit