

Ein schaltbarer Lichtstreuer

Ein einzelnes Farbstoffmolekül kann als rein optischer Transistor dienen und einen stark fokussierten Laserstrahl abschwächen oder verstärken.

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup, 3. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70550 Stuttgart

Der globale Informationsaustausch und die Telekommunikation finden in Fasernetzwerken statt, deren Länge einem Vielfachen des Erdumfangs entspricht. Der erfolgreiche Datentransfer in diesen Fasern hängt von einer enormen Vielzahl von Routern, Schaltern und letztendlich Prozessoren ab, die alle nach dem gleichen Prinzip funktionieren. Das optische Signal wird in ein elektronisches verwandelt, prozessiert und wieder zurück transformiert. Die Geschwindigkeit, mit der dies geschieht, begrenzt die Rate des globalen Datentransfers.

Rein optische Bauteile versprechen, dieses Nadelöhr zu umgehen, indem optische Signale einander direkt kontrollieren. Zentrale Bauteile von rein optischen Schaltern oder Routern sind Transistoren, die auf dem Niveau weniger oder einzelner Photonen arbeiten. Zusätzlich zur vergrößerten Bandbreite hätten diese Schalter den Vorteil, dass sich eine neue Klasse von Informationsnetzwerken – nämlich Quantenkommunikationsnetzwerke – implementieren ließe, indem einzelne Photonen einander kontrollieren.

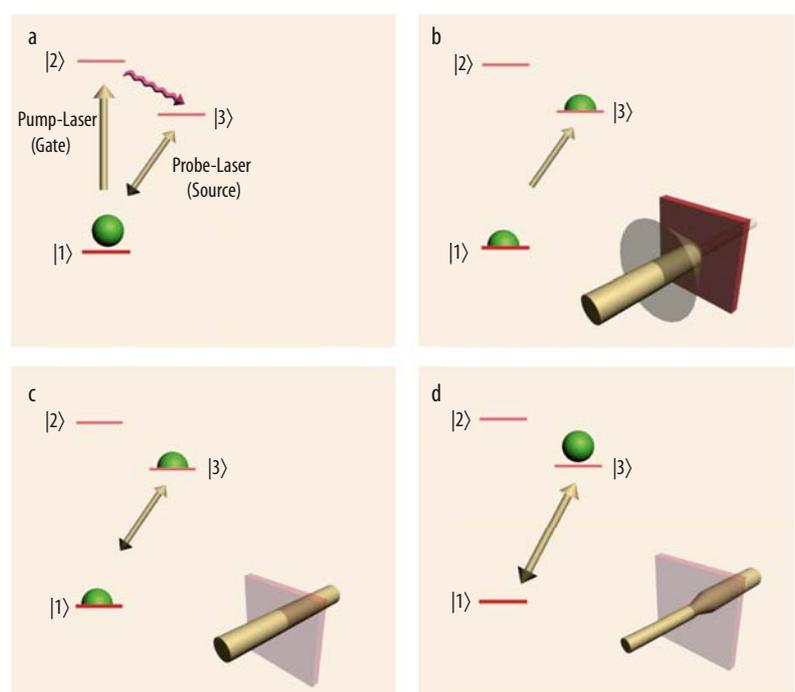
Eine direkte Photonen-Photonen-Wechselwirkung ist aufgrund der geringen elektrischen Felder in Photonen aber nicht zu beobachten. Diese Felder sind auch klein, wenn man sie mit typischen atomaren oder in Festkörpern anzutreffenden elektrischen Feldern vergleicht, sodass die entsprechenden nichtlinearen optischen Koeffizienten in der Regel auch in kondensierter Materie gering sind. Entsprechend groß war die Herausforderung, Materialien und Systeme für optische Schalt- und Transistorelemente zu entwickeln [1], z. B. Resonatoren hoher Güte. Außerdem ließen sich plasmatische Nanostrukturen erzeugen und Quanteninterferenzeffekte wie elektromagnetisch induzierte Transparenz beobachten. Systeme wie optische Halbleiterverstärker, Solitonen in Halbleiterresonatoren oder Siliziumringresonatoren erscheinen zudem sehr gut miniaturisierbar zu sein.

Diese Miniaturisierung haben Wissenschaftler von der ETH Zürich nun auf die Spitze getrieben, indem sie eine Photonen-Photonen-Wechselwirkung an

einem einzelnen Molekül gezeigt haben [2]. Ein Farbstoffmolekül, das in einen optisch transparenten Molekülkristall eingebettet wird, dient dabei quasi als schaltbarer Lichtstreuer (Abb.). In dieser Kristallanordnung treten auch Phononen auf. Das Besondere daran ist, dass das Farbstoffmolekül bei tiefen Temperaturen eine geringe Elektronen-Phononen-Wechselwirkung aufweist. Bei geeigneter experimenteller Anordnung, d. h. tiefen Temperaturen und sorgfältig fokussiertem Laser, vergrößert dies den Wechselwirkungsquerschnitt zwischen Molekül und Phonon.

Das Molekül lässt sich zu einem effektiven Drei-Niveau-System reduzieren. Eine optische Anregung von $|1\rangle$, dem Grundzustand, nach $|2\rangle$ mittels eines Pump- oder Gate-Lasers führt über eine schnelle interne Konversion zur Bevölkerung des Niveaus $|3\rangle$. Dieses Niveau wiederum ist durch ein resonantes Laserfeld („Source-Drain“-Laser) mit dem Grundzustand $|1\rangle$ verbunden. Das Transmissionsverhalten des Moleküls bezüglich des Source-Lasers lässt sich mit dem Gate-Laser um bis zu acht Prozent ändern! Das

Ein kontinuierlicher Pump-Laser bringt das Farbstoffmolekül vom Grundzustand in den angeregten Zustand $|2\rangle$, von wo es unter interner Konversion in den Zustand $|3\rangle$ übergeht (a). Das angeregte Molekül kann die Ausbreitung der Photonen eines anderen einfallenden Lasers (Source) beeinflussen. Ohne Pump-Laser absorbiert das Molekül den Probe-Laser, die halbe Kugel bedeutet halbe Bevölkerung (b). Dies ist dargestellt durch die opake Scheibe, die das Molekül repräsentiert, und durch den aufgeweiteten und rückgestreuten Laserstrahl (spontane Fluoreszenz). Wenn die Pump-Laserintensität so gewählt wird, dass die Transferrate zwischen Zustand $|1\rangle$ und $|3\rangle$ so groß wie die mittlere Lebensdauer des Zustandes $|3\rangle$ ist, wird das Molekül für den Probe-Laser vollkommen transparent (c). Entsprechend wird der Probe-Laserstrahl nicht aufgeweitet. Bei höherer Pump-Laserintensität beobachtet man stimulierte Emission auf der Wellenlänge des Probe-Lasers (d).



Besondere an der Anordnung ist zudem, dass die molekulare Wechselwirkung zwischen dem Molekül und dem Source-Laser kohärent ist. So konnten die Wissenschaftler aus Zürich stimulierte Emission messen. Diese Ergebnisse markieren einen wichtigen Meilenstein für das Erreichen einer kontrollierten und effizienten Wechselwirkung zwischen Licht und quantenoptischen Festkörpersystemen. Für eine weitergehende Anwendung sind allerdings noch einige Hindernisse aus dem Weg zu räumen.

Eine der wichtigsten Verbesserungen besteht darin, langlebige Schaltzustände statt des mit ca. 10 ns schnell zerfallenden Zustands $|3\rangle$ zu benutzen. Hierfür kommen z. B. metastabile Zustände infrage. Wichtiger noch scheint es jedoch, den Wechselwirkungsquerschnitt zu vergrößern. Zwar lassen sich durch geschickt gewählte Modenpräparation des anregenden Lasers Streuwahrscheinlichkeiten

von nahezu hundert Prozent erreichen [3]. Allerdings erfordert dies hohe Streuquerschnitte, die die Moleküle nur bei sehr tiefen Temperaturen erreichen. Vielversprechender ist es wahrscheinlich, eine höhere Modendichte des Laserfelds, z. B. kombiniert mit Plasmonen, zu erzielen [4]. Sollte dies, ähnlich wie an der ETH Zürich gezeigt, in Form einer kohärenten Wechselwirkung realisierbar sein, so könnte der optische Einzelmolekültransistor ein wichtiger Baustein für die Quantentechnologie werden [5].

Jörg Wrachtrup

- [1] A. M. C. Dawes, *Physica Status Solidi Rapid Research Letters* **3**, A17 (2009)
- [2] J. Hwang et al., *Nature* **460**, 76 (2009)
- [3] G. Zumofen, N. M. Mojarad, V. Sandoghdar und M. Agio, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 180404 (2008)
- [4] D. E. Chang, A. S. Sorensen, E. A. Demler und M. D. A. Lukin, *Nature Physics* **3**, 807 (2007)
- [5] R. Kolesov et al., *Nature Physics* **5**, 470 (2009)

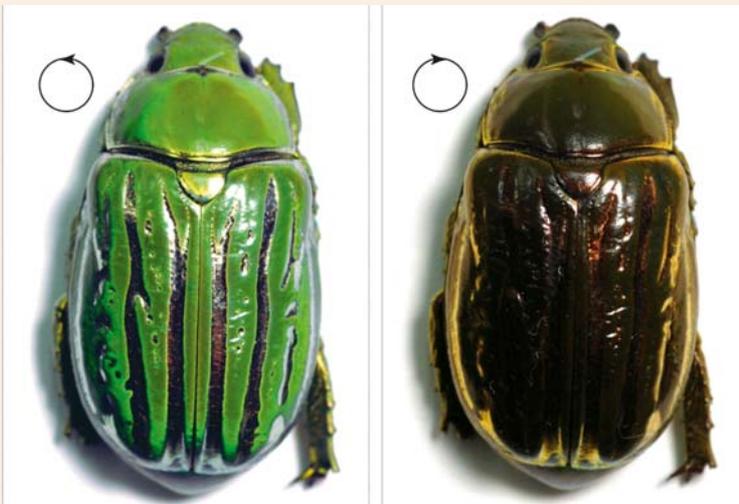
FLOTTER KÄFER

Der Käfer *Chrysina gloriosa* hat den richtigen Dreh raus: Forscher vom Georgia Institute of Technology haben mittels mikroskopischer Methoden herausgefunden, dass sein Panzer schraubenförmige Strukturen enthält, ähnlich cholesterischen Flüssigkristallen mit ihrer sich kontinuierlich drehenden Vorzugsrichtung. Die Strukturen sind optisch aktiv und sorgen für die metallisch grüne Farbe des Käfers sowie dafür, dass reflektiertes Licht zirkular

polarisiert wird. Grund dafür sind Fehlstellen, welche die geordneten Molekülschichten zueinander verdrehen.

Diese Käferstrukturen wollen die Forscher für den Menschen nutzbar machen, z. B. um besonders schimmernde metallische Farben herzustellen. Dafür nehmen sie eine cholesterische Flüssigkeit und verändern die Bedingungen, unter denen die Oberflächendefekte auftauchen.

V. Sharma et al., *Science* **325**, 449 (2009)



Der Käfer *Chrysina gloriosa* schimmert hellgrün metallisch (links). Blockiert man links zirkular polarisiertes Licht

mithilfe eines Polarisators (rechts), verliert der Käfer seinen Schimmer.