

chen Stellen an die Gewährung der Gelder oft willkürliche Bedingungen geknüpft, die die Universitäten finanziell belasten. Deshalb will das NSTC die Aufgaben und Verantwortlichkeiten zwischen den Universitäten und den staatlichen Stellen klarer geregelt wissen. Außerdem richtet der Report sein Augenmerk auf das Verhältnis von Forschung und Lehre. Die Studenten seien nicht nur Auszubildende, sondern auch zugleich Forscher. Dies müsse in ihrer Behandlung durch das US-Finanzamt berücksichtigt werden.

## Uniassistenten-Gewerkschaft

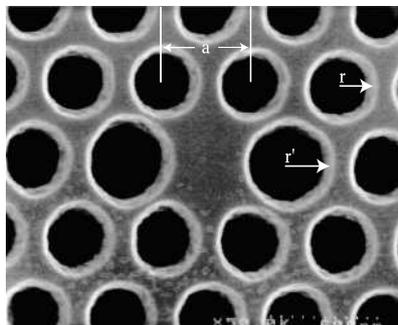
Mit großer Mehrheit haben sich die Assistenten der University of California für eine gewerkschaftliche Interessenvertretung ausgesprochen. Dieses Recht war ihnen bisher verwehrt worden. Mit der Wahl eines gewerkschaftsfreundlichen Gouverneurs und der erfolgreichen Durchführung eines landesweiten Streiks kam die Wende. Die Assistenten fordern die Verbesserung ihrer Arbeitsbedingungen sowie angemessene Sozialleistungen. Im Sommer beginnen die Verhandlungen mit der Universitätsverwaltung.

RAINER SCHARF

## Laserlicht aus porösen Strukturen

Poröse Strukturen stoßen auf zunehmendes Interesse, wenn es um die wohldefinierte Erzeugung von Licht und um dessen geführte bzw. unterdrückte Ausbreitung in dielektrischen Medien geht. Wenn im Idealfall die Poren dieser Strukturen in allen Raumrichtungen regelmäßig mit der Periode der halben Lichtwellenlänge  $\lambda$  angeordnet sind, kann es sich ergeben, daß die Ausbreitung von Licht mit Wellenlängen um  $\lambda$  vollständig unterdrückt wird: Man spricht von einer „Photonischen Bandlücke“ – in weitgehender Analogie zu elektronischen Bandlücken von Halbleitern – und nennt das dazugehörige Medium „Photonischer Kristall“ (vgl. Phys. Bl., April 1999, S. 27). Ein wichtiger Vorteil Photonischer Kristalle wird z. B. darin gesehen, daß sich bei geschickter Manipulation des Kristalls verschiedenste Funktionselemente auf kleinstem Raum unterbringen, d. h. integrieren lassen.

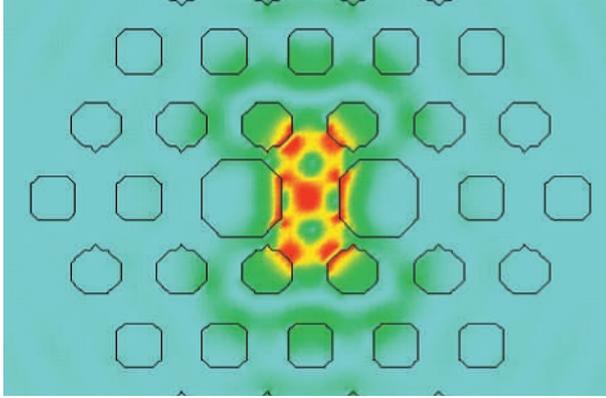
Zwei der unmittelbar anwendungsbezogenen Ziele, die man mit solchen Strukturen erreichen möchte, sind erstens der schwellenstromlose Halbleiterlaser, in dem die Verluste durch spontane Emission eliminiert wurden, und zweitens die Leuchtdiode mit hohem externen Quantenwirkungsgrad.



**Abb. 1:** Aufsicht auf eine dünne Membrane mit hexagonal angeordneten Löchern und einem Defekt, der darin besteht, daß ein Loch ausgelassen wurde. Die beiden zentralen Löcher wurden zur Feineinstellung von Modenfrequenz und -güte leicht vergrößert. Die Gitterkonstante  $a$  beträgt 515 nm, und die Lochradien sind  $r = 180$  nm und  $r' = 240$  nm. Die InGaAsP-Membrane, in die vier Quantentrog-Schichten eingebaut wurden, ist 220 nm dick. Dies entspricht  $\lambda/2$  der optischen Dicke bei  $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$  Wellenlänge. (Abb.: O. Paintner)

Auf dem Weg zum ersten Ziel sind Wissenschaftler des California Institute of Technology (Caltech) einen bedeutenden Schritt weitergekommen [O. Paintner et al., Science **284**, 1819 (1999)]: Sie haben die „guten“ Eigenschaften von räumlich stark lokalisierten Moden, die sich an einzelnen Defekten eines zweidimensionalen Photonischen Kristalls herausbilden, mit denen optisch aktiver Quantentröge gekreuzt (Abb. 1). Der Photonische Kristall trägt dabei zur genauen Definition der räumlichen Ausdehnung und damit auch der Frequenz und Struktur der Defektmode bei; die vier Quantentröge aus InGaAsP (ausgezeichnet durch geringe nichtstrahlende Oberflächenrekombination) befinden sich in einer nur 220 nm dicken, freitragenden Membrane. Die Defektmode wird vertikal durch den großen Brechungsindexkontrast an den Grenzen der InGaAsP-Schicht eingengt. Pumpt man Energie in die Quantentröge und regt damit Exzitonen an, so können diese nur rekombinieren, indem sie ein Photon in die vorgegebene Defektmode emittieren, da nur diese Zustände für die Ausbrei-

tung anbietet. Auf diese Weise gelang es, einen lateral sehr kompakten Mikrolaser zu realisieren, der nur wenige  $\mu\text{m}^2$  groß ist (Abb. 2). Durch optisches Pumpen mit einem Diodenlaser bei einer Wellenlänge von 830 nm zeigte sich Lasertätigkeit bei der nachrichtentechnisch interessanten Wellenlänge von



**Abb. 2:** Zweidimensionaler Schnitt durch die Mitte der Membrane mit der berechneten Feldstärke der am Defekt lokalisierten Schwingungsmoden. Die Feldstärke nimmt von grün über gelb nach rot zu. (Abb.: O. Painter).

1,5  $\mu\text{m}$  mit einer Linienbreite von unter 0,2 nm. Um die Quantisierung der Exzitonenzustände und damit die intensive Emission mit scharf definierter Wellenlänge nicht zu verlieren, mußte die Struktur auf ca. 140 K abgekühlt werden. Bis zur Realisierung eines elektrisch gepumpten Bauteils hat die Gruppe am Caltech noch eine Reihe von technologischen Problemen (pn-Übergang, elektrische Kontaktierung, besseres „Einsperren“ in vertikaler Richtung, Degradation) zu bewältigen. Die Funktionsfähigkeit bei Zimmertemperatur wäre bereits mit Quantenpunkten, z. B. des InGaAs-Systems, zu erwarten.

ALBERT BIRNER

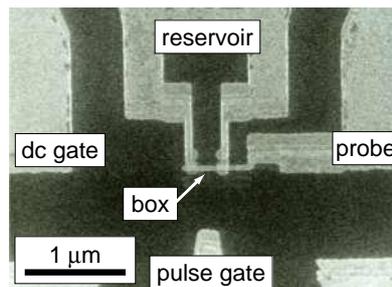
Dipl.-Phys. Albert Birner, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Weinberg 2, D-06120 Halle

## Quantenbit aus Alu

Noch gibt es keinen Quantencomputer. Aber an Vorschlägen, wie die Hardware einer solchen Rechenmaschine aussehen könnte, mangelt es nicht. Und in einem bemerkenswerten Tempo werden neue Systeme untersucht, die sich zur Realisierung von Quantenbits, den Informationseinheiten eines Quantencomputers, eignen würden. Vor kurzem haben Physiker von den NEC-Forschungslaboratorien in Ibaraki, Japan, das erste Festkörper-Quantenbit verwirklicht. Sie brachten zwei makroskopische Quantenzustände eines supraleitenden Metallstreifens zur Überlagerung [Y. Nakamura, Yu A. Pashkin, J. S. Tsai, Nature **398**, 768 (1999)].

Dieses System könnte eines Tages als Quantenbit (Qubit) in einem Quantencomputer fungieren, sofern man die kontrollierte Kopplung mehrerer Qubits erreichte.

Quantenbits unterscheiden sich von den Bits der herkömmlichen Computer dadurch, daß sie nicht nur die digitalen Werte 0 und 1, sondern beliebige Superpositionen dieser Zahlen annehmen können. Im Prinzip eignet sich dafür jedes quantenmechanische Zwei-Niveau-System, vorausgesetzt, man kann die beiden Zustände kontrolliert miteinander koppeln und ihre Besetzung durch einen Meßprozeß auslesen. Allerdings muß das Qubit von seiner Umgebung möglichst gut isoliert sein, damit die Kohärenz der Superpositionszustände für die Dauer der Rechenoperation erhalten bleibt. Die ersten quantenlogischen Operationen mit Qubits wurden mit gespeicherten Ionen und mit Kernspins von Molekülen in einer Flüssigkeit durchgeführt [Phys.



Ein supraleitender Josephson-Kontakt als Quantenbit. Durch Anlegen einer Spannung an die DC-Elektrode läßt sich das Tunneln eines einzelnen Cooper-Paars vom Reservoir auf die Metallinsel steuern. Dort entsteht eine Superposition aus zwei makroskopischen Quantenzuständen. Über den Tunnelstrom zur Test-Elektrode (*probe*) wird das Qubit ausgelesen. (Abb.: Y. Nakamura)

Bl., Juni 1998, S. 502]. Ein Qubit in einem Festkörper zu realisieren scheiterte bislang an den Störeinflüssen – Gitterschwingungen, elektronisches Rauschen, Fehlstellen im Kristall – und an der Schwierigkeit, zwei diskrete Quantenzustände auszuzeichnen und zu überlagern.

Letzteres haben Yasunobu Nakamura und seine Mitarbeiter geschafft, indem sie einen winzigen Metallstreifen aus Aluminium mit einer Fläche von 50 nm  $\times$  15 nm auf ein isolierendes Substrat aufdampften: die „Cooper-Paar-Box“ mit etwa  $10^8$  Leitungselektronen. Eine weitere Aluminiumelektrode, durch eine dünne Isolierschicht von dem Streifen getrennt, diente als Reser-

voir für Elektronen (Abb.). Bei tiefen Temperaturen schließen sich je zwei Elektronen zu Cooper-Paaren zusammen, die im Kastenpotential des Aluminiumstreifens zu einem makroskopischen Quantenzustand kondensieren, ähnlich einem Bose-Einstein-Kondensat. Das gesamte System bildet einen Josephson-Kontakt, das heißt, Cooper-Paare tunneln vom Reservoir durch die Isolierschicht in die Cooper-Paar-Box und zurück. Wegen der geringen Abmessungen des Streifens liegen die diskreten Energieniveaus jedoch so weit auseinander, daß der Tunnelprozeß unterdrückt wird. Allerdings lassen sich zwei benachbarte Niveaus durch Anlegen einer Spannung in Resonanz bringen. Diesen Effekt nutzte Nakamuras Gruppe aus, um ein einzelnes, zusätzliches Cooper-Paar vom Reservoir kontrolliert auf den Metallstreifen und zurück tunneln zu lassen. Die beiden Zustände, die das Zwei-Niveau-System des Qubits definierten, waren die jeweiligen Quantenzustände in der Cooper-Paar-Box – einmal mit ( $|1\rangle$ ) und einmal ohne ( $|0\rangle$ ) zusätzliches Cooper-Paar. Stoppt man den Transfer während des Tunnelns, so befindet sich das Qubit in einer linearen Superposition von  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$ .

Um das Qubit auszulesen, brauchen die Physiker die Cooper-Paar-Bindung mit Hilfe einer Gleichspannung auf und registrierten den Tunnelstrom vom Aluminiumstreifen zu einer weiteren Elektrode (*probe*). Vom Zustand  $|1\rangle$  können die beiden zusätzlichen Elektronen als Quasipartikel zur Test-Elektrode tunneln und dort registriert werden. Andernfalls fließt kein Tunnelstrom – so lassen sich beide Quantenzustände unterscheiden. Allerdings hat dieser Aufbau den Nachteil, daß er die Kohärenzzeit des Qubits begrenzt: Nach wenigen Nanosekunden wird der Superpositionszustand durch die dissipative Kopplung an die Test-Elektrode zerstört. Für die Verwendung des Qubits in einem Quantencomputer muß diese Kohärenzzeit noch verlängert werden. Außerdem gilt es, zwei Festkörper-Qubits kontrolliert miteinander zu koppeln, so daß ein logisches Quantengatter entsteht. Wenn diese Hindernisse überwunden sind, wird man dem Quantenrechnen wieder einen Schritt näher sein.

MAX RAUNER