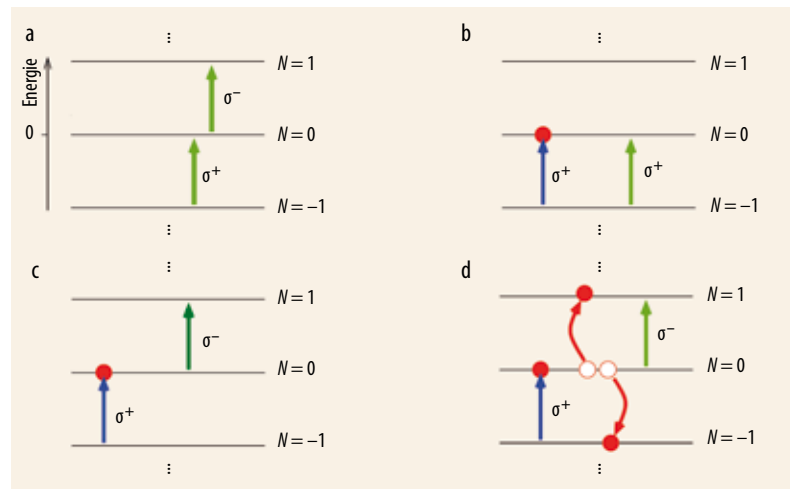


## ■ Inversionslage in Graphen

Zeitaufgelöste Messungen haben gezeigt, dass Auger-Prozesse das zentrale Landau-Niveau in Graphen entvölkern, während gerade dieses optisch gepumpt wird.

**B**esetzungsinversion in Elektronensystemen, d. h. die stärkere Besetzung eines angeregten Energieniveaus als eines tiefergelegenen, ist ein wesentlicher Bestandteil des Lasers. Dieser funktioniert mittels stimulierter Emission, bei der ein resonant eintreffendes Photon den elektronischen Übergang vom angeregten zum tieferliegenden Zustand stimuliert, sodass ein weiteres Photon mit gleicher Energie und Phase emittiert wird. Diese Photonenmultiplikation bewirkt jenen Strahl kohärenten Lichts, der für den Laser charakteristisch ist. Seit geraumer Zeit gehen Forscher in der kondensierten Materie der Idee nach, einen Laser in zweidimensionalen Elektronensystemen zu realisieren [1], in denen die Elektronenenergie mithilfe eines Magnetfeldes in Landau-Niveaus quantisiert wird. Im thermodynamischen Gleichgewicht füllen die Elektronen diese hochentarteten Niveaus bis zum Index  $N$ . Das Niveau mit dem Index  $N + 1$ , das dem angeregten Energiezustand entspricht, ist nicht besetzt. Der Vorteil gegenüber konventionellen Lasern bestünde darin, dass sich über das Magnetfeld die Energielücke zwischen den Landau-Niveaus und damit die Laserfrequenz variieren ließe. Die offensichtliche Schwierigkeit besteht aber darin, eine einigermaßen langlebige Besetzungsinversion zwischen benachbarten Landau-Niveaus zu erzeugen.

Kürzlich haben Forscher um Martin Mittendorff und Stephan Winnerl mittels magneto-optischer Messungen gezeigt, dass eine verstärkte Besetzung angeregter Landau-Niveaus in Graphen in der Tat möglich ist [2]. Dabei haben sie epiktaktische Graphenproben [3] vom Georgia Institute of Technology (USA) mittels zeitaufgelöster Spektroskopie untersucht. Graphen hat eine besondere Bandstruktur: Im Vergleich zu konventionellen zweidimensionalen Systemen wie GaAs-Heterostrukturen mit einer paraboli-



**Abb. 1** (a) Landau-Niveaus in Graphen und polarisationsabhängige Übergänge. (b) Auf einen Pumpimpuls mit  $\sigma^+$ -polarisiertem Licht (blauer Pfeil) kann entweder ein Probenimpuls mit gleicher Polarisierung

folgen (hellgrüner Pfeil, b) oder mit  $\sigma^-$ -Polarisation (dunkelgrüner Pfeil, c). Auger-Prozesse (rote Pfeile, d) entvölkern das zentrale Niveau durch Elektronentransfer in benachbarte Niveaus.

sehen Banddispersion ist Graphen ein etwas „eigenartiger“ Halbleiter ohne Energielücke. Valenz- und Leitungsband sind in sog. Dirac-Punkten verbunden und besitzen dort eine lineare Banddispersion. Ohne Dotierung liegt das Fermi-Niveau genau in diesen Punkten, sodass sich undotiertes Graphen durch eine perfekte Elektron-Loch-Symmetrie auszeichnet. Liegt nun ein Magnetfeld an, bilden sich Landau-Niveaus aus. Die lineare Bandstruktur von Graphen ergibt dabei zwei Familien von Niveaus (eine im Leitungs- und eine im Valenzband). Im Gegensatz zu konventionellen Elektronensystemen sind diese nicht äquidistant und skalieren nicht linear mit dem Feld ( $B(N + 1/2)$ ), sondern wie  $\pm \sqrt{BN}$  [4]. Direkt am Dirac-Punkt bildet sich das zentrale Landau-Niveau  $N = 0$  heraus, das in gewisser Weise ein zwittriges Wesen zwischen Leitungs- und Valenzband und im undotierten Fall halb gefüllt ist.

Die im Experiment verwendeten Proben sind allerdings aufgrund der Fabrikation leicht negativ dotiert, sodass die Elektron-Loch-Symmetrie gebrochen ist. Bei den angelegten Magnetfeldern von 5 bis 10 T ist das zentrale Niveau partiell

besetzt und besitzt zwei benachbarte Niveaus,  $N = 1$  im Leitungsband und  $N = -1$  im Valenzband, mit jeweils derselben Energielücke (Abb. 1). Im Prinzip könnte ein resonant eintreffendes Photon den  $0 \rightarrow 1$ - oder den  $-1 \rightarrow 0$ -Übergang anregen. Welchen es anregt, hängt in Graphen von seiner (zirkularen) Polarisation ab: Ein  $\sigma^+$ -polarisierter Puls regt den Übergang  $-1 \rightarrow 0$  an und sorgt für eine stärkere Besetzung des zentralen Landau-Niveaus, ein  $\sigma^-$ -polarisierter Puls regt den Übergang  $0 \rightarrow 1$  an, wodurch die Besetzung des zentralen Niveaus sinkt.

Was würde man nun erwarten, wenn auf einen Pumpimpuls (blauer Pfeil in Abb. 1) in kurzem zeitlichen Abstand (wenige ps) ein Probenimpuls (grüner Pfeil) folgt? Hat der zweite Lichtpuls dieselbe Polarisation, stehen ihm weniger Elektronen für den gleichen Übergang zur Verfügung, sodass die Absorptionswahrscheinlichkeit des zweiten Photons sinkt (Abb. 1b). Umgekehrt ist es, wenn das zweite Photon entgegengesetzt polarisiert ist. Hat zum Beispiel der Pumpimpuls ( $\sigma^+$ ) Elektronen vom Niveau  $N = -1$  in das zentrale Niveau gepumpt, so stehen mehr Zustände für einen  $0 \rightarrow 1$ -Übergang zur Ver-

fügung, sodass die Absorption für Photonen mit  $\sigma^-$ -Polarisation höher ist (Abb. 1c).

Wie verhält sich nun das Experiment zu dieser Erwartung? Während die Messungen für einen Pumpimpuls mit  $\sigma^-$ -Polarisation in der Tat diesem Bild entsprechen, zeigen sich starke Abweichungen bei Pumpen mit  $\sigma^+$ -polarisiertem Licht. Insbesondere ist die Absorption bei einem  $\sigma^-$ -polarisierten Probenpuls geringer. Numerische Berechnungen im Rahmen des Dichtematrixformalismus kamen zu dem Ergebnis, dass Auger-Prozesse, die aufgrund der leichten Elektronendotierung auftreten, für dieses Phänomen verantwortlich sind [2]. Bei diesen durch die Coulomb-Wechselwirkung erzeugten Prozessen, die in Graphen besonders stark zu sein scheinen, füllt ein Elektron aus dem zentralen Niveau auf sehr kurzen Zeitskalen das in  $N = -1$  erzeugte Loch auf. Die freigesetzte Energie sorgt zeitgleich für eine  $0 \rightarrow 1$ -Anregung, sodass es

sich insgesamt um einen elastischen Prozess handelt. Hierbei verlassen zwei Elektronen das zentrale Landau-Niveau (rote Pfeile in Abb. 1d), während ein Photon des Pumpimpulses dort lediglich ein Elektron erzeugt hat. Folglich verursacht die geringere Besetzung des Ausgangsniveaus die verringerte Absorption des Probenphotons. Ähnliche Abweichungen zeigten sich auch für einen  $\sigma^+$ -polarisierten Probenpuls.

Auger-Prozesse entvölkern also das zentrale Landau-Niveau in Graphen, während gleichzeitig das Niveau  $N = 1$  besetzt wird. Die polarisationsabhängigen Übergänge, die für Auger-Prozesse notwendig sind, sind eine Besonderheit von Graphen. Auch wenn dies noch keine für den Landau-Niveau-Laser nötige Besetzungsinversion ist, scheinen diese starken Auger-Prozesse vielversprechend, um dieses Ziel zu erreichen. Darauf weisen auch weiterführende theoretische Studien hin, die noch nicht veröffentlicht sind [5]. Allerdings

liegen die untersuchten Übergänge bei Magnetfeldern von knapp unter 10 T im Bereich von 100 meV, d. h. weit unter den optisch sichtbaren Übergängen bei etwa 1 eV. Letztere würden bei gleichen Feldstärken höhere Landau-Niveaus ( $|N| \gg 1$ ) benötigen. In Graphen sinkt aber der Energieabstand zwischen benachbarten Niveaus, die zudem aufgrund von Verunreinigungen verbreitert sind, sodass höherliegende Niveaus schlechter aufgelöst sind. Der Weg zu einem Landau-Niveau-Laser ist somit noch weit, doch die neuen Ergebnisse könnten auch für andere Anwendungen in der Optik relevant sein.

Mark Oliver Görbig

Prof. Dr. Mark Oliver Görbig, Laboratoire de Physique des Solides, CNRS, Université Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex, Frankreich

- [1] H. Aoki, Appl. Phys. Lett. **48**, 559 (1986)
- [2] M. Mittendorff et al., Nat. Phys. **11**, 75 (2015)
- [3] W. A. de Heer et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **43**, 274007 (2010)
- [4] J. W. McClure, Phys. Rev. **104**, 666 (1956)
- [5] F. Wendler und E. Malic, arXiv:1410.2080