

Nanosekunden Entstehungszeit benötigen [2], während in zeitaufgelösten Lumineszenz-Messungen [4] Exzitonresonanzen bereits 100 bis 300 fs nach der Kontinuumsanregung vorhanden waren. Andere Experimente lieferten auch Hinweise auf ein reines Elektron-Loch-Plasma [3].

Ein Experiment von Sangam Chatterjee aus der Gruppe von Hyatt Gibbs in Arizona hat nun eine neue Antwort auf die Frage vorgeschlagen: „Ab wann existieren Exzitonen?“ [5]. Dazu wurden die Methoden der zeitaufgelösten Anrege-Abfrage-Spektroskopie und der zeitaufgelösten Lumineszenzspektroskopie verbunden. Die erste Methode erlaubt es, die absorbierte Lichtmenge und somit die Ladungsträgerdichte sehr genau zu bestimmen; über die zweite Methode erhält man die Ladungsträgertemperatur. Das Experiment wurde in InGaAs bei 4 K und bei 50 K durchgeführt, und die Anregungsdichte wurde dabei über mehrere Größenordnungen variiert. Wie erwartet, zeigt sich in der Lumineszenz eine charakteristische Resonanzstruktur bei der Exzitonenergie. Die Frage, ob diese Struktur auf Exzitonen oder auf ein Elektron-Loch-Plasma zurückgeht, lässt sich nur durch einen Vergleich mit der Theorie beantworten. Die systematische und detaillierte Berücksichtigung aller Beiträge zur Lumineszenz zeigt, dass die Resonanzen, bei denen Lumineszenz auftritt, durch die Eigenenergien des Coulomb-wechselwirkenden Systems gegeben sind. Die Quellen der Lumineszenz sind daher sowohl das Elektron-Loch-Plasma als auch Exzitonen.

Gebundene (Wannier-) Exzitonen befinden sich in wasserstoffartigen Zuständen (1s, 2s, 2p, ...) mit Energien, die um die Exzitonbindungsenergie unter die Bandkante abgesenkt sind. Nicht-gebundene Elektron-Loch-Paare besetzen hingegen Zustände mit Energien oberhalb der Bandkante. Dennoch wechselwirken sie miteinander aufgrund der langreichweitigen Coulomb-Wechselwirkung. Wenn man nur die Energie (Einteilchenenergie) dieser Elektronen und Löcher ansieht, kann man nicht verstehen, warum sie an der Exzitonenergie zur Lumineszenz beitragen können. Vereinfachend kann man sagen, dass bei der Emission die Überschussenergie an das restliche Plasma abgegeben wird, das dadurch „aufgeheizt“ wird.

Diese Zusatzenergie wird von dem Plasma aber per Phononenkopplung an das Gitter abgegeben.

Die theoretische Betrachtung erlaubt es, die dichte- und temperaturabhängigen Messungen konsistent zu beschreiben. Die wesentlichen Erkenntnisse dabei sind, dass die Photolumineszenz an der Exzitonenergie bei niedrigen Dichten und niedrigen Temperaturen in der Tat durch die Rekombination von optisch aktiven Exzitonen dominiert wird, bei hohen Dichten und bei hoher Temperatur aber durch Plasma-Rekombination. Das Verhältnis von optisch aktiven zu optisch inaktiven Exzitonen und der Anteil der exzitonischen Lumineszenz sind dabei Fitparameter in der Theorie.

Nur ein noch aufwändigeres Experiment wäre wohl in der Lage, die Frage nach der Ursache der Photolumineszenz an der Exzitonenergie experimentell endgültig zu beantworten: dazu sollten die Methoden von Chatterjee und Kaindl kombiniert werden. Man müsste gleichzeitig bei ein und derselben Probe unter identischen Bedingungen zeitaufgelöste Anrege-Abfrage-, Lumineszenz-, und THz-Spektroskopie durchführen, und das für verschiedene Temperaturen und Anregungsdichten. Die Unsicherheit beim jetzigen Vergleich zwischen Theorie und Experiment liegt nämlich im Verhältnis von nicht-strahlenden und strahlenden Exzitonen sowie den Oszillator-

stärken der strahlenden Exzitonen. Da die THz-Spektroskopie in der Absorption sowohl dunkle als auch strahlende Exzitonen nachweist, ließe sich durch den Vergleich mit der Lumineszenzspektroskopie, die nur strahlende Exzitonen „sieht“, der Anteil der dunklen Exzitonen simultan messen und die noch vorhandene Unsicherheit ausräumen.

Weiterhin könnte ein Vergleich der bisherigen Experimente in III-V-Halbleitern mit zukünftigen in II-VI-Halbleitern (z. B. in ZnSe, Cu₂O), in denen die Exzitonbindungsenergie größer und die Phononenanpassung stärker sind, Hinweise darauf geben, ob die Dynamik der Exzitenbildung und somit die emittierte Strahlung stark vom gewählten System abhängen. Hinweise darauf [7] deuten an, dass die Diskussion spannend bleiben wird, mit Leidenschaft geführt wird sie allemal.

HARALD GIESSEN

- [1] M. Kira et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 3263 (1998)
- [2] R. Kaindl et al, Nature **423**, 734 (2003)
- [3] R. Chari et al., Proceedings QELS-Konferenz 2003, Paper QPDThA8
- [4] G. R. Hayes et al., phys. stat. sol. (a) **190**, 3263 (2002)
- [5] S. Chatterjee et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 067402 (2004)
- [6] R. J. Elliott, Phys. Rev. **108**, 1384 (1957)
- [7] M. Umlauff und H. Kalt, Phys. Rev. B **57**, 1390 (1998)

Prof. Dr. Harald Giessen, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn, Wegelerstraße 8, 53115 Bonn

Ein Schmetterling wird dreißig

Während eines Forschungsaufenthalts an der Universität Regensburg berechnete Douglas Hofstadter 1974/75

das Energiespektrum von Elektronen, die sich in einem periodischen Kristallpotential sowie einem homogenen Magnetfeld bewegen. Mit dem Ergebnis, das aufgrund der Ähnlichkeit mit einem

Schmetterling fortan als Hofstadter-Butterfly bekannt wurde, führte Hofstadter die Begriffe Selbstähnlichkeit und Fraktale in der Festkörperphysik ein. Ein program-

mierbarer Tischrechner, genannt Rumpelstilzchen, unterstützte ihn bei den langwierigen Berechnungen und spinn

so gewissermaßen über Nacht Gold. Am Lehrstuhl für Wissenschaftsgeschichte der Universität Regensburg wurde nun eine Broschüre zur Geschichte des Schmetterlings mit u. a.

Beiträgen von Hofstadter veröffentlicht, die über broschuere@physikgeschichte.org bezogen werden kann. Weitere Infos finden sich unter <http://butterfly.physikgeschichte.org>.

