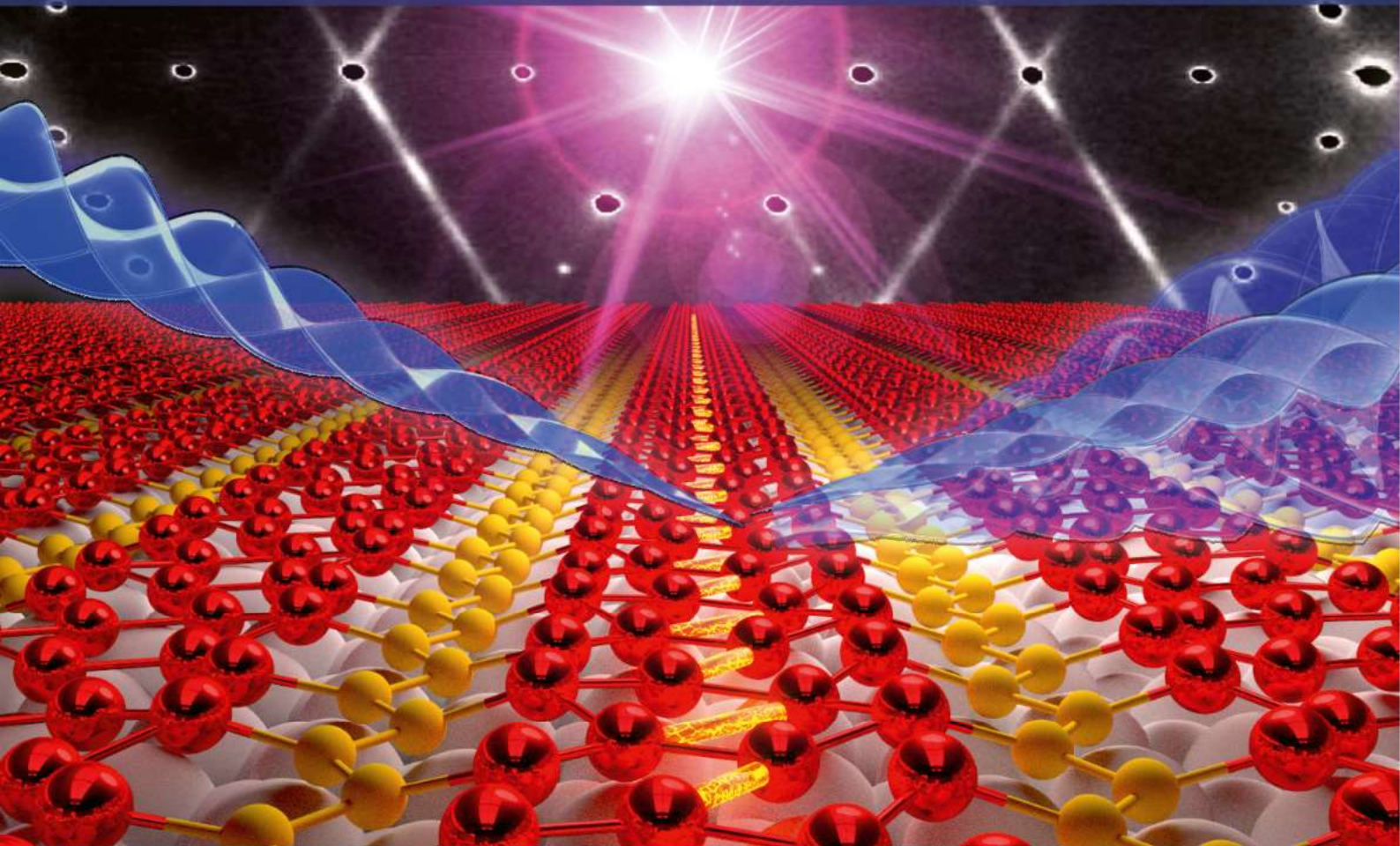


SO SCHNELL BEWEGEN SICH ATOME



Indium wird innerhalb von einigen Hundert Femtosekunden von einem Isolator zum elektrischen Leiter. Beobachten lässt sich der Übergang mithilfe von Elektronenbeugung – und der Anrege-Abfrage-Technik.

Elektrische Schalter haben eine einfache Funktion: Sie ändern ihren Zustand von „Strom kann fließen“ zu „Strom kann nicht fließen“, also von elektrisch leitfähig zu isolierend. In den schnellsten heute erhältlichen Mikroprozessoren schalten die dort verbauten Transistoren im Takt von rund fünf Gigahertz. Ein Schaltvorgang dauert damit rund 0,2 Milliardstel Sekunden (0,000 000 000 2 Sekunden, 2 Pikosekunden, siehe auch S. 6). Eine Verkürzung des Schaltvorgangs auf die Hälfte ist in den nächsten Jahren wahrscheinlich erreichbar.

Wesentlich schneller sind Schaltvorgänge von Drähten aus dem leitfähigen Metall Indium, die nur ein Atom dick sind und auf einer hochreinen

Siliziumoberfläche aufgebracht sind. Was bekannt ist: Diese Anordnung kennt je nach Temperatur zwei Zustände: Bei tiefen Temperaturen unterhalb von -143 °C ordnen sich die Indium-Atome zu unregelmäßigen Sechsecken an, die voneinander getrennt sind. Strom können sie daher nicht leiten. Erwärmt man sie, so bilden sie einen dünnen Draht von nur vier Atomen Breite aus, durch den Strom fließen kann.

ÜBERGANG VOM LEITER ZUM ISOLATOR

Mit unserem Experiment haben wir untersucht, wie schnell genau der Übergang zwischen diesen beiden Zuständen geschieht. Dazu nutzten wir

ABFRAGE MIT ELEKTRONEN

Zusätzlich zur schnellen Zeitauflösung müssen wir mit starker Vergrößerung auf unsere Objekte schauen. Die Lösung: Wir nutzen Elektronen, die an den Atomen unserer Probe gebeugt werden. Die Elektronenpulse – die genauso wie der anregende Laserpuls nur wenige Hundert Femtosekunden lang dauern dürfen – erzeugen wir mit einem Teil des Laserpulses. So haben beide die gleiche extrem kurze Pulsdauer. Allerdings ist die Handhabung des Elektronenpakets etwas schwieriger als die des Laserlichts: Die Elektronen stoßen sich gegenseitig ab und verbreitern so den Puls sehr schnell. Dagegen hilft nur eine hohe Geschwindigkeit des Elektronenstroms: In unserem Fall bewegen sich die Elektronen mit einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit!

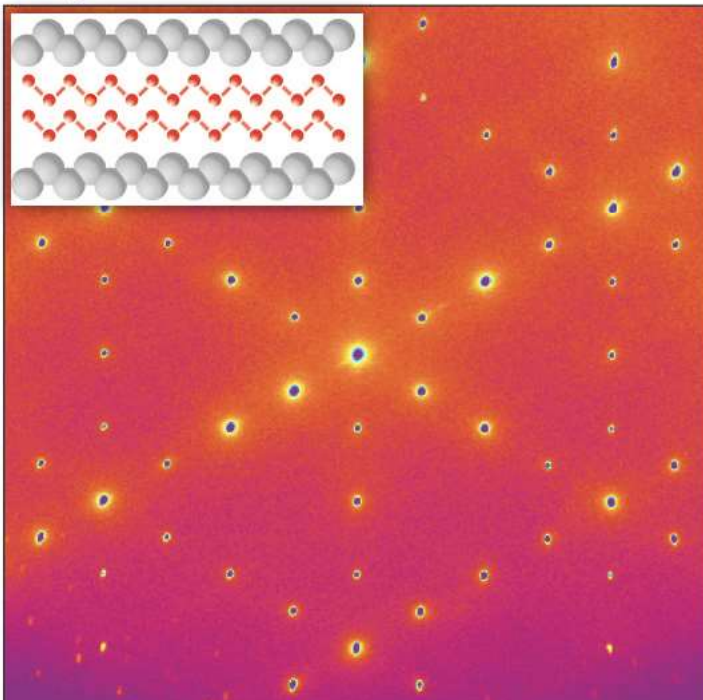
Das Anrege-Abfrage-Experiment läuft so ab, dass die Oberfläche des Siliziumkristalls mit dem Laserpuls angeregt wird. Die Änderung der geometrischen Struktur der Atomanordnung an der Kristalloberfläche wird nun mithilfe des zeitverzögerten Elektronenpulses abgefragt. Systematisches Ändern der Verzögerungszeit zwischen Anregung und Abfrage erlaubt dann die Aufnahme eines Films mit den Änderungen im Beugungsbild, ohne dass der Detektor eine ultrakurze Belichtungszeit ermöglichen müsste.

eine Anrege-Abfrage-Methode, bei der Laserpulse mit nur 80 Femtosekunden Dauer das Startsignal geben (das sind 0,000 000 000 000 08 Sekunden – in dieser Zeit legt Licht gerade einmal 0,024 Millimeter zurück). Jeder dieser Blitze ist dabei sehr intensiv: Für die Dauer des Pulses wird die Oberfläche unserer Probe mit dem Billionenfachen der Helligkeit der Sonne beleuchtet! Da die Blitze allerdings so ultrakurz sind, überlebt die Probe diese Prozedur unbeschadet.

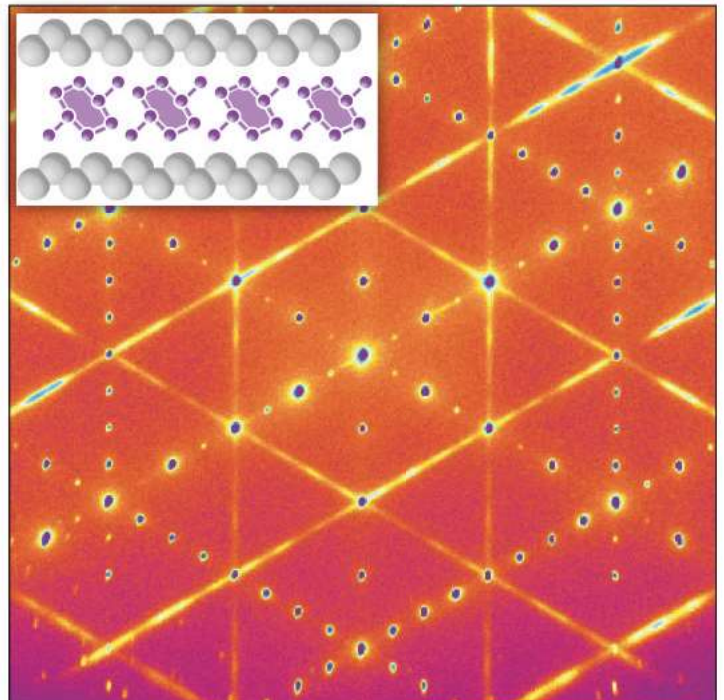
Der Laserpuls regt die Indium-Atome dazu an, ihren Zustand zu verändern. Nur 100 Femtosekunden nach dem ersten Puls senden wir einen ebenfalls sehr kurzen Elektronenpuls auf die Probe. Das durch ihn entstehende Beugungsbild nehmen wir mit einer Kamera auf, nicht nur einmal, sondern 5000-mal pro Sekunde. Das wird über mehrere Sekunden hinweg aufsummiert – jeweils mit dem Abstand von 100 Femtosekunden zwischen Laseranregung und Elektronenbeschuss der Probe. So entsteht ein Beugungsbild, aus dem wir auf die Oberflächenstruktur der Probe

Zwei mögliche Ausprägungen der Indiumdrähte, die von Siliziumstrukturen (grau) zusammengehalten werden: In der Zickzack-Anordnung (links) bilden die Indium-Atome eine elektrisch leitende Struktur. Im Beugungsbild ist diese durch ein regelmäßiges Punktmuster zu erkennen. In der Anordnung mit verzerrten Sechsecken, die bei sehr tiefen Temperaturen niedriger als -143°C auftritt, hat sich rechts die isolierende Struktur eingestellt. Das Beugungsmuster weist neben den Punkten auch Streifen auf.

Leitfähig



Isolierend





Dieser vergoldete Probenhalter lässt sich auf 20 Kelvin (-253° Celsius) abkühlen. Ganz links am Ende befindet sich die als schmaler dunkler Streifen sichtbare Probe.

100 Femtosekunden nach der Anregung zurück-schließen können.

Im nächsten Experiment warten wir mit dem Elektronenpuls nicht mehr 100, sondern 200, dann 300, dann 400 Femtosekunden und so weiter. Erreicht der zeitliche Abstand zwischen Anregungs- und Abfragepuls 700 Femtosekunden, dann hat sich das Beugungsbild deutlich verändert: Aus den isolierenden Sechsecken aus Indium auf der Siliziumoberfläche sind die bei höheren Temperaturen bekannten leitenden Drähte geworden. Hat der Anregungslaser die Indium-Atome also so schnell aufgeheizt?

SCHNELLE, BESCHLEUNIGTE BEWEGUNG

Wie so oft ist die Welt komplizierter als unsere Vorstellung. Unsere weiteren Messungen ergaben, dass sich das Beugungsbild nach 6000 Femtosekunden – fast zehnmal so lang, wie die Bildung der Drähte dauert – noch einmal verändert, und dass dies auf die Aufheizung zurückgeführt werden kann.

Die Ursache für den Übergang vom Isolator zum Metall nach 700 Femtosekunden liegt vielmehr in

den elektronischen Bindungen: Der Laserpuls verändert den Zustand der Elektronen in der Atomhülle der Indium-Atome, sodass existierende Bindungen abgeschwächt und gleichzeitig neue Bindungen geschaffen werden. Dies führt zu einer schnellen, beschleunigten Bewegung der Atome in die leitende Phase. Dabei müssen sich die Indium-Atome nur Bruchteile eines Atomabstands bewegen. Aus der Wegstrecke und der dafür benötigten Zeit konnten wir auch die Geschwindigkeit der Atome bestimmen: $2 \cdot 10^{-11}$ Meter in $700 \cdot 10^{-15}$ Sekunden, was etwa 28 Metern pro Sekunde entspricht, also 100 km/h. Das ist zwar ganz ordentlich, aber von jedem PKW zu schlagen.

Viel eindrucksvoller ist die Beschleunigung der Atome von 0 auf 100 km/h in weniger als 1000 Femtosekunden: Das wäre von einem PKW niemals zu leisten. Selbst ein Tennisball beim Aufschlag braucht für die Beschleunigung auf über 100 km/h rund 0,03 Sekunden. Die Beschleunigung der Atome ist im Vergleich dazu einige Milliarden Mal höher – und das alles aufgrund eines ultrakurzen, superhellen Laserpulses.

Projektleitung: Michael Horn-von Hoegen