

**Press release****Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie i  
Alexandra Wettstein**

06/27/2024

<http://idw-online.de/en/news836061>Research results, Scientific Publications  
Physics / astronomy  
transregional, national

Max Born Institute

und Berlin e.

**Grundlegende räumliche Grenzen der volloptischen Magnetisierungsschaltung**

Die Magnetisierung eines Materials kann mit einem einzigen Laserpuls umgeschaltet werden. Es ist jedoch nicht bekannt, ob der zugrundeliegende mikroskopische Prozess auf die Nanometer-Längenskala skalierbar ist, eine Voraussetzung, um diese Technologie für künftige Datenspeicheranwendungen wettbewerbsfähig zu machen. Forscher des Max-Born-Instituts in Berlin, Deutschland, haben in Zusammenarbeit mit Kollegen des Instituto de Ciencia de Materiales in Madrid, Spanien, und der Freie-Elektronen-Laseranlage FERMI in Triest, Italien, eine grundlegende räumliche Grenze für die lichtgetriebene Magnetisierungsumkehr ermittelt.

Die Magnetisierung eines Materials kann mit einem einzigen Laserpuls umgeschaltet werden. Es ist jedoch nicht bekannt, ob der zugrundeliegende mikroskopische Prozess auf die Nanometer-Längenskala skalierbar ist, eine Voraussetzung, um diese Technologie für künftige Datenspeicheranwendungen wettbewerbsfähig zu machen. Forscher des Max-Born-Instituts in Berlin, Deutschland, haben in Zusammenarbeit mit Kollegen des Instituto de Ciencia de Materiales in Madrid, Spanien, und der Freie-Elektronen-Laseranlage FERMI in Triest, Italien, eine grundlegende räumliche Grenze für die lichtgetriebene Magnetisierungsumkehr ermittelt.

Moderne magnetische Festplatten können mehr als ein Terabit an Daten pro Quadratzoll speichern, was bedeutet, dass die kleinste Informationseinheit auf einer Fläche von weniger als 25 Nanometern mal 25 Nanometern kodiert werden kann. Beim laserbasierten, rein optischen Schalten (AOS) werden magnetisch kodierte Bits mit einem einzigen ultrakurzen Laserpuls zwischen ihrem "0"- und "1"-Zustand umgeschaltet. Um das volle Potenzial von AOS auszuschöpfen, insbesondere im Hinblick auf schnellere Schreib-/Löschzyklen und eine verbesserte Energieeffizienz, müssen wir daher verstehen, ob ein magnetisches Bit auch dann noch vollständig optisch umgeschaltet werden kann, wenn seine Größe im Nanometerbereich liegt.

Damit AOS stattfinden kann, muss das magnetische Material auf sehr hohe Temperaturen erhitzt werden, damit seine Magnetisierung gegen Null reduziert wird. Erst dann kann seine Magnetisierung umgekehrt werden. Der Clou bei AOS ist, dass es für die magnetische Umschaltung ausreicht, nur die Elektronen des Materials zu erhitzen, während das Gitter der Atomkerne kalt bleibt. Dies ist genau das, was ein optischer Laserpuls tut: Er wechselwirkt nur mit den Elektronen und ermöglicht es, mit sehr geringer Leistung hohe Elektronentemperaturen zu erreichen. Da jedoch heiße Elektronen durch Streuung an den kalten Atomkernen sehr schnell abkühlen, muss die Magnetisierung innerhalb dieser charakteristischen Zeitskala ausreichend schnell reduziert werden, d. h. AOS beruht auf einem sorgfältig austarierten Gleichgewicht zwischen der Entwicklung der Elektronentemperatur und der Verringerung der Magnetisierung. Es ist leicht zu erkennen, dass sich dieses Gleichgewicht ändert, wenn die optische Anregung auf die Nanoskala beschränkt ist: Jetzt können die Elektronen nicht nur Energie verlieren, indem sie den Atomkernen "einen Tritt verpassen", sondern sie können die nanometerkleinen heißen Regionen auch einfach durch Diffusion verlassen. Da sie dabei nur eine nanometerkleine Strecke zurücklegen müssen, läuft auch dieser Prozess auf einer ultraschnellen Zeitskala ab, so dass die Elektronen zu schnell abkühlen können, die Magnetisierung in dieser kurzen Zeit nicht ausreichend verringert wird und AOS nicht stattfinden kann.

Einem internationalen Forscherteam ist es nun erstmals gelungen, durch die Kombination von Experimenten mit weicher Röntgenstrahlung und Berechnungen der Entwicklung der Magnetisierung an den Atomen die Frage "wie klein funktioniert AOS noch?" zu beantworten. Sie erzeugten ein extrem kurzlebige Muster aus dunklen und hellen Laserlichtstreifen auf der Probenoberfläche des prototypischen magnetischen Materials GdFe, indem sie zwei

Röntgenlaserpulse zur Interferenz brachten. Dadurch konnte der Abstand zwischen dunklen und hellen Bereichen auf nur 8,7 nm reduziert werden. Diese Beleuchtung ist nur für etwa 40 Femtosekunden vorhanden und führt zu einer lateralen Modulation der Temperatur der Elektronen im GdFe, mit einem entsprechenden Verlust der lokalen Magnetisierung. Die Wissenschaftler konnten dann verfolgen, wie sich dieses Muster auf den sehr kurzen Zeitskalen, die von Bedeutung sind, weiterentwickelt. Zu diesem Zweck wurde ein dritter Röntgenlaserpuls mit der gleichen Wellenlänge von 8,3 nm zu unterschiedlichen Zeiten an dem transienten Magnetisierungsmuster gebeugt. Bei dieser speziellen Wellenlänge ermöglicht eine elektronische Resonanz an den Gadoliniumatomen, dass der Röntgenpuls das Vorhandensein der Magnetisierung "spürt" und somit die Änderung der Magnetisierung mit einer zeitlichen Auflösung von Femtosekunden und einer räumlichen Auflösung im Sub-Nanometerbereich nachweisen kann.

Durch die Kombination der experimentellen Ergebnisse mit modernsten Simulationen konnten die Forscher den nanoskaligen und ultraschnellen Energietransport bestimmen. Es stellte sich heraus, dass die Mindestgröße für AOS in GdFe-Legierungen, die durch eine periodische Anregung im Nanomaßstab hervorgerufen wird, bei etwa 25 Nanometer liegt. Diese Grenze ist auf die ultraschnelle laterale Elektronendiffusion zurückzuführen, die die beleuchteten Bereiche auf diesen winzigen Längenskalen schnell abkühlt und letztlich das Umschalten der „Bits“ verhindert. Die schnellere Abkühlung durch die Elektronendiffusion kann bis zu einem gewissen Grad durch eine Erhöhung der Anregungsleistung kompensiert werden, aber dieser Ansatz ist letztlich durch die einsetzende strukturelle Schädigung des Materials durch den intensiven Laserstrahl begrenzt. Die Forscher gehen daher davon aus, dass die 25-Nanometer-Grenze für alle metallischen magnetischen Materialien gültig ist.

Bildunterschrift:

Zwei Röntgenlaserpulse interferieren auf der Oberfläche einer ferrimagnetischen GdFe-Legierung, was zu einer lateralen Modulation der Elektronentemperaturen, einer Verringerung der lokalen Magnetisierung und zu einem rein optischen Schalten der Magnetisierung führt. So können einzelne Bits rein optisch gestaltet werden. Auf der rechten Seite wird die Gitterperiode und damit die Größe eines Bits auf weniger als 25 Nanometer reduziert. Unter diesen Bedingungen wäscht das Temperaturprofil wäscht sich aus, bevor die Magnetisierung ausreichend reduziert ist, und das optische Schalten bricht zusammen. Bildnachweis: Moritz Eisebitt

contact for scientific information:

Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie im Forschungsverbund Berlin e.V.  
[www.mbi-berlin.de](http://www.mbi-berlin.de)

Dr. Clemens von Korff Schmising  
[korff@mbi-berlin.de](mailto:korff@mbi-berlin.de)  
+49 30 6392 1372

Prof. Dr. Stefan Eisebitt  
[eisebitt@mbi-berlin.de](mailto:eisebitt@mbi-berlin.de)  
+49 30 6392 1300

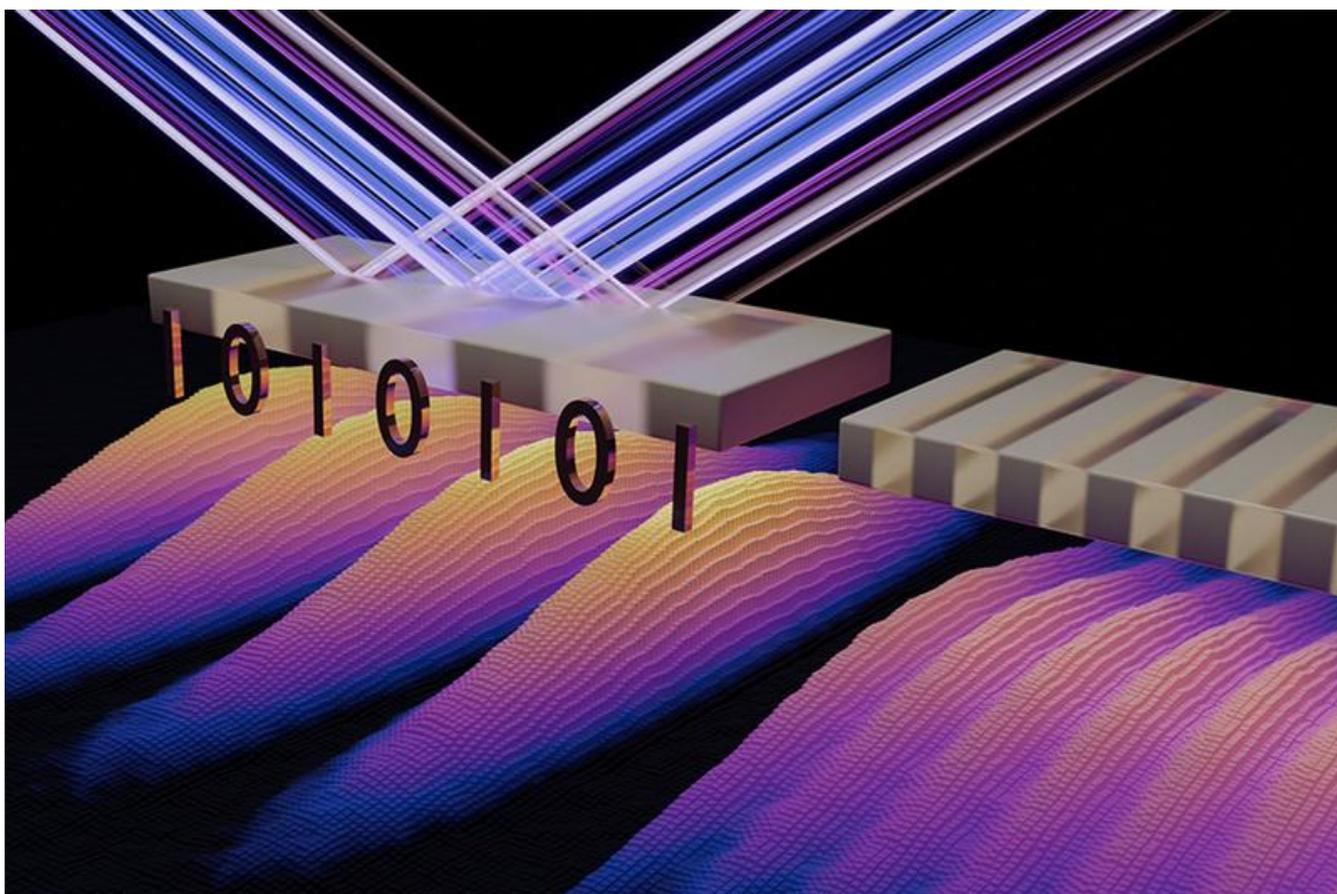
Original publication:

Exploring the Fundamental Spatial Limits of Magnetic All-Optical Switching

Felix Steinbach, Unai Atxitia, Kelvin Yao, Martin Borchert, Dieter Engel, Filippo Bencivenga, Laura Foglia, Riccardo Mincigrucci, Emanuele Pedersoli, Dario De Angelis, Matteo Pancaldi, Danny Fainozzi, Jacopo Stefano Pelli Cresi, Ettore Paltanin, Flavio Capotondi, Claudio Masciovecchio, Stefan Eisebitt, und Clemens von Korff Schmising

Nano Lett. 2024, 24, 23, 6865–6871 <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c00129>  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.4c00129#>  
<https://mbi-berlin.de/research/highlights/details/fundamental-spatial-limits-of-all-optical-magnetization-switching>

URL for press release: <http://Achtung: auf unserer Webseite finden Sie eine erweiterte Pressemitteilung inklusive weiteres Bildmaterial>



Zwei Röntgenlaserimpulse interferieren  
Bildnachweis: Moritz Eisebitt