

7 Zusammenfassung und Ausblick

Während dieser Diplomarbeit wurde die Möglichkeit geschaffen, ultrahohe Gleichstromdichten im Bereich von 10^{12} A/m² in magnetischen Permalloy- und nichtmagnetischen Kupfer-Nanodrähten über Zeiträume von mehreren Minuten bis zu über einer halben Stunde zu realisieren. Zusätzlich wurde eine Methode entwickelt, mit der während der fließenden, hohen Stromdichte die im Nanodraht herrschende Temperatur gemessen werden kann.

Die zur Erzielung der ultrahohen Stromdichten entwickelte Präparationsmethode verwendet Diamant-Substrate, die außerordentlich hohe thermische Leitfähigkeiten aufweisen. Mittels FIB-strukturierter Siliziumnitrid-Membranen als Schattenmasken werden die Nanodrähte aufgedampft und per Bonder kontaktiert. Zur Durchführung der Messungen wurde eine Hochvakuumkammer aufgebaut, die eine Kühlung der Probe mit flüssigem Stickstoff ermöglicht und so die Überhitzung der Nanodrähte verhindert. Nach Beenden der Messungen können die Diamant-Substrate nasschemisch gereinigt und wiederverwendet werden.

Die hergestellten Proben wurden mittels REM und AFM charakterisiert. Es zeigt sich, dass die Nanodrähte Widerstände aufweisen, die über den theoretisch erwarteten Werten liegen. Diese Beobachtung kann durch verstärkte Streuung der Leitungselektronen an rauen Oberflächen, Korngrenzen und Gitterfehlern erklärt werden. Bei hohen Temperaturen im Nanodraht treten Annealing-Effekte auf, die den Widerstand durch Wachstum der Körner eines Drahtes irreversibel senken. Es konnten Widerstandsabnahmen auf unter 75 % festgestellt werden.

Mit mehreren Proben, sowohl mit Permalloy- als auch mit Kupferdrähten, konnten Stromdichten jenseits von 10^{12} A/m² stabil für mehrere Minuten erreicht werden. Die anschließende Zerstörung der Drähte wurde erst durch eine weitere Erhöhung der Stromdichten herbeigeführt und nicht durch eine langsame Verschlechterung der Draht-eigenschaften während der hohen Stromdichten verursacht. Es ist daher wahrscheinlich, dass geringfügig kleinere Stromdichten über noch deutlich längere Zeiträume jenseits einer Stunde aufrechterhalten werden können. Durch die Aufzeichnung des Widerstandes eines Nanodrahtes während der gesamten Messung ist es möglich, eine Temperaturkalibrierung vorzunehmen und so Aussagen über die im Nanodraht herrschende Temperatur zu treffen. Auch bei den höchsten stabil erreichten Stromdichten von $3,5 \cdot 10^{12}$ A/m² lag die Temperatur in den Permalloydrähten deutlich unterhalb der Curie-Temperatur, d. h. es liegt noch ein ferromagnetisches Verhalten vor.

Die Untersuchung der Erwärmungsprozesse beim Erhöhen der Stromdichte zeigt, dass mindestens ein sehr schneller Prozess existiert, der mit dem verwendeten Versuchsaufbau nicht aufgelöst werden konnte. Für zwei weitere Prozesse konnten Zeitkonstanten von 17 ms und 42 ms für Permalloy- und 29 ms und 107 ms für Kupferdrähte bestimmt werden. Die Erwärmung der Kupferplatte besitzt eine Zeitkonstante von etwa 60 s.

Durch die Verwendung von Nanodrähten mit Verengungen konnte die Schwachstelle

7 Zusammenfassung und Ausblick

der Nanodrähte von dem Übergang der Kontaktpads zum Isolationskanal in die Mitte des Isolationskanals verschoben werden. Es ist jedoch auf diese Weise nicht gelungen, grundsätzlich höhere Stromdichten zu erreichen.

Weiterhin konnte mittels AMR-Messungen bestätigt werden, dass die präparierten Permalloydrähte ein ferromagnetisches Verhalten aufweisen.

Durchgeführte Simulationsrechnungen zeigen, dass sich bei hohen Stromdichten im Nanodraht ein Temperatur- und daraus resultierend ein Stromdichtegradient bildet. Bei späteren Untersuchungen der strominduzierten Domänenwandbewegung sollte dies bedacht werden.

Abschließend lässt sich feststellen, dass das Ziel, die Voraussetzungen für die Untersuchung der strominduzierten Domänenwandbewegung im Rasterelektronenmikroskop mit Polarisationsanalyse (SEMPA) zu schaffen, erreicht wurde. Noch während der Fertigstellung dieser Arbeit konnten erste Aufnahmen von Domänenwänden in Permalloy-Nanodrähten mittels SEMPA erstellt werden. Darüber hinaus wurden wichtige Erkenntnisse erlangt, die zum Verständnis der präparierten Nanodrähte beitragen und bei weiteren Untersuchungen hilfreich sein können.

Um in Zukunft noch höhere Stromdichten stabil zu erreichen, bzw. vergleichbare Stromdichten noch länger aufrechtzuerhalten, ist es möglich, die Proben in der SEMPA-Kammer mithilfe des konstruierten SEMPA-Probenhalters mit flüssigem Helium statt flüssigem Stickstoff zu kühlen. Erste Tests wurden hierzu bereits durchgeführt, die Probentemperatur konnte auf diese Weise unter 40 K gesenkt werden.

Weiterhin ist es denkbar, das Annealing der Nanodrähte vor den Messungen gezielt herbeizuführen, indem nicht die Temperaturerhöhung aufgrund des fließenden Stroms, sondern eine externe Substratheizung verwendet wird. Auf diese Weise ließe sich im gesamten Nanodraht, unabhängig von einer möglicherweise vorhandenen Verengung, eine gleichmäßige Temperatur erreichen. Im Gegensatz zur Erwärmung des Nanodrahtes aufgrund des Stroms ist die Temperatur in diesem Fall noch besser kontrollierbar und ließe sich auch über mehrere Stunden aufrechterhalten. Da das Heizen der Probe unter Hochvakuumbedingungen erfolgen sollte, um Oxidation zu vermeiden, bietet sich die Kammer des Elektronenstrahlverdampfers an, für die bereits eine Substratheizung existiert.

Die Untersuchungen mittels SEMPA könnten durch AMR-Messungen an Nanodrähten, die einen leichten Knick besitzen, ergänzt werden. Befindet sich im Knick eine Domänenwand, ist der Widerstand gegenüber einem Knick ohne Domänenwand aufgrund der senkrechten Komponente der Magnetisierung zur Stromrichtung reduziert. Es ließe sich so vergleichsweise leicht feststellen, ob sich eine vorhandene Domänenwand durch einen entsprechend hohen Strompuls vollständig aus dem Draht herausbewegen lässt.

Die erreichten ultrahohen Stromdichten könnten auch für andere Anwendungen interessant sein. So ist es z. B. denkbar für die Erzeugung hoher, lokaler Magnetfelder, ringförmige Nanodrähte zu verwenden, in deren Zentrum sich zu untersuchende Mikro- oder Nanostrukturen befinden.

Ultrahohe Gleichstromdichten in magnetischen Nanodrähten auf Diamant-Substrat

Diplomarbeit

am

**Institut für Angewandte Physik
der Universität Hamburg**

vorgelegt von

Konrad Sachse

2. Juni 2008