

Elektronenstrahlolithographie von Quantumwires und Antidots

Markus Hauser
Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck
6020 Innsbruck

Zur Elektronenstrahlolithographie wird ein digitales Rasterelektronenmikroskop (Zeiss DSM 950) verwendet, das durch die Möglichkeit der externen Steuerung der Strahlablenkung als hochauflösendes Schreibgerät verwendet werden kann. Die Elektronenquelle besteht aus einer Wolframhaarnadelkathode, die Beschleunigungsspannung läßt sich zwischen 490V und 30kV variieren. Für die Lithographie wurde eine Spannung von 20kV gewählt. Das Linsensystem besteht aus einem Paar magnetischer Kondensoren mit Zwischenblende (Doppelzoomkondensator), einer variablen Aperturblende und einer Objektivlinse. Mit dieser Anordnung läßt sich der Strahlstrom zwischen etwa 15nA und 0.5 pA einstellen. Zur Lithographie wurde eine Aperturblende mit 70µm Durchmesser verwendet. In der Objektivlinse sind auch das Ablenkensystem und die Astigmatismuskorrektur untergebracht. Die Strahlablenkung erfolgt durch Sattelspulen; diese Anordnung erlaubt eine größte Schreibfläche von ca. 4x4mm. Der Präparattisch läßt sich in drei Richtungen über Handkurbeln jeweils mit etwa 50µm Genauigkeit bewegen. Zusätzlich ist der Tisch frei drehbar und bis 60° kippbar. Aufgrund der Ungenauigkeit der Positionierung können Muster nicht durch Aneinanderlegen von Belichtungsfeldern vergrößert werden. Das Strahlensystem enthält ebenfalls keine Vorrichtung zur schnellen Strahlaustastung, sodaß im Lithographiebetrieb einige Einschränkungen in Kauf genommen werden müssen.

Das Auflösungsvermögen dieser Anordnung kann analog zur optischen Lithographie aus der Auflösung von Teststrukturen das Auflösungsvermögen bestimmt werden. Diese Methode hat aber prinzipiell die gleichen Nachteile wie bei optischer Lithographie, da hier diverse andere Parameter, wie Substratbeschaffenheit, Resist, Art der Belichtung und weitere eingehen. Deshalb wurde das Profil des fokussierten Strahls direkt bestimmt, indem er langsam senkrecht über die Kante eines Absorbers geführt und dabei die Transmission gemessen wurde. Als Absorber diente ein Stück eines gespaltenen Siliziumwafers, um eine möglichst scharfe Kante zu erhalten. Der kleinste Strahldurchmesser wurde für die gewählten Parameter (20kV, 3pA) zu 15nm ermittelt, dieser ist vergleichbar mit der von PMMA theoretisch erreichbaren Auflösung.

Das Musterdesign und die Steuerung der Belichtung erfolgt mit Hilfe des ELPHY I Paketes (Fa. Raith). Das Schreibfeld verfügt über eine Auflösung von bis zu 12 bit — es stehen bis 4096 Punkte pro Seitenlänge zur Verfügung. Die Größe des Schreibfeldes wird manuell über die Mikroskopvergrößerung eingestellt. Als Konstruktionselemente stellt das Programm Rechtecke, rechtwinkelige Dreiecke und Viertelkreisringe zur Verfügung, die mit individuell einstellbarer Dosis bestrahlt werden können. Bei der Belichtung rastert der Elektronenstrahl jedes Element einzeln ab. Dadurch kann die Gesamtbelichtungszeit gegenüber einem einfachen Rasterverfahren je nach belichteter Fläche deutlich verkürzt werden, was der Reproduzierbarkeit sehr förderlich ist, da die Elektronik, besonders die Ablenkverstärker und die Strahlerzeugung in bezug auf Stabilität nicht für Lithographie ausgelegt sind. Das gilt vor allem bei Ausnützung der vollen Auflösung und bei großen Schreibfeldern, etwa zur Herstellung von Masken für die optische Lithographie, da die Belichtung des gesamten Schreibfeldes über eine Stunde dauern kann.

Als elektronenempfindlicher Resist wird PMMA verschiedener mittlerer Molekulargewichte

eingesetzt. Die Beschichtung der Substrate (chrombedampfte Glasplatten, Stücke von Siliziumwafern, GaAs-Heterostrukturen), erfolgt auf einer handelsüblichen Lackschleuder. Die Lackdicke variiert je nach Anwendung zwischen 100 nm und einigen μm . Nach der Beschichtung werden die Substrate im Heißluftofen oberhalb der Glasübergangstemperatur getrocknet. Dabei dampfen Lösungsmittel- und Monomerreste ab und Spannungen in der Resistschicht bauen sich ab. Das Fließen der hochviskosen Schmelze bewirkt zugleich eine deutliche Verbesserung der Haftung am Substrat.

Der eigentliche Belichtungsvorgang läuft zwar computergesteuert ab, sämtliche Justier- und Positioniervorgänge müssen aber manuell ausgeführt werden, wobei die oben erwähnte laterale Positioniergenauigkeit von etwa $50\mu\text{m}$ besteht. Da auch die Möglichkeit fehlt, Positionsmarken einzulesen, entwickelt sich der Belichtungsprozeß bei Strukturen, die relativ genau positioniert werden müssen, wie etwa Gateelektroden von HEMTs, zu einer recht umständlichen und zeitraubenden Prozedur.

Die Entwicklung des Resist erfolgt sofort nach der Belichtung durch ein schwaches Lösungsmittel. Dabei gehen jene Teile des Resist in Lösung, die mit genügend hoher Dosis bestrahlt wurden. Mit dem hier verwendeten Entwicklungsprozeß läßt sich ein Kontrast von etwa 3 erreichen. Überhängende Resistkanten, die für die Abhebetechnik notwendig sind, können durch Resistsysteme erreicht werden, die aus mehreren Schichten von PMMA verschiedenen mittleren Molekulargewichtes bestehen.

Der strukturierte Lackfilm dient entweder als Ätzresist oder Aufdampfmaske. Dieser eignet sich sowohl für reaktives Plasmaätzen (RIE) als auch für naßchemisches Ätzen. Die Widerstandsfähigkeit gegenüber RIE ist zwar relativ gering, reicht aber für viele Zwecke aus. Als Schutzmaske beim naßchemischen Ätzen ist PMMA sehr gut verwendbar, da es inert gegenüber den meisten Agenzien ist, seine schlechte Benetzbarkeit läßt sich meist durch Zusätze zum Ätzmittel beseitigen.

Die Möglichkeit Strukturen im Submikrometerbereich herzustellen wurde für zahlreiche Experimente genutzt: Die Lichtabstrahlung von AlGaAs/GaAs Doppelheterostrukturen kann durch Oberflächenplasmonen in bezug auf Abstrahlcharakteristik und externe Quanteneffizienz optimiert werden. Liniengitter wurden durch reaktives Ionenätzen 40-60nm tief ins Substrat übertragen. Auf die Oberfläche wurde dann eine 25nm dicke Silberschicht aufgedampft, die als Kontakt und als Medium für die Oberflächenplasmonen dient. Dadurch werden Verluste durch interne Totalreflexion vermindert. Andererseits koppeln die in der Diode erzeugten Photonen an Oberflächenplasmonen, die an der Grenzflächen zur Luft in Photonen zerfallen und abgestrahlt werden. Dadurch erhöht sich die externe Quantenausbeute um über 50%. Zusätzlich ergibt sich eine im Vergleich zu unstrukturierten LEDs extrem gerichtete Abstrahlung des p-polarisierten Anteils senkrecht zur Oberfläche. Das Abstrahlungsmuster läßt sich dabei über die Gitterperiode beeinflussen [1].

An 2DEG mit strukturierter Gateelektrode wurden Magnetowiderstandsmessungen durchgeführt (Antidots). Das Gate besteht hier aus einem Punktgitter, das zu einer in zwei Dimensionen periodischen, schwachen Potentialmodulation im 2D-Kanal führt. Bei kleinen Magnetfeldern (unter 1T) treten Oszillationen des Widerstandes auf, deren Periode in $1/B$ in direktem Verhältnis zur Gitterperiode steht [2].

Bei stärkerer Potentialmodulation, die durch Einätzen des Antidotgitters in die Oberfläche erzielt werden kann, treten gepinnte Zyklotronbahnen auf. Diese haben Maxima im Widerstand zur Folge, wenn Elektronen auf ihren Kreisbahnen jeweils 1, 2, 4, 9 oder 21 Antidots einschließen und nicht mehr zum Transport beitragen. Ein anderer Weg, die Experimente zu erklären, bietet die numerische Lösung der Bewegungsgleichung unter Verwendung eines Modellpotentials zur Beschreibung der Antidots [3]. Betrachtet man die Bewegung der Elek-

tronen im Phasenraum, zeigen sich bei angelegtem elektrischen Feld chaotische Bahnen und ein Bereich mit stabilen Trajektorien, was zu den beobachteten Oszillationen des Magnetowiderstandes führt.

Auf GaAs-HEMTs wurden die Transporteigenschaften in naßchemisch geätzten Quantumwires verschiedener Länge untersucht. Einflüsse des Randes, Potentialfluktuationen und Störstellen im Kanal führen zu einem gegenüber dem 2DES veränderten Magnetowiderstand und zu Nichtlinearitäten in der Strom-Spannungs-Kennlinie. Daraus folgt eine stark längenabhängige Reduzierung der Beweglichkeit im 1D-Kanal, wobei kurze Kanäle die höchste Beweglichkeit besitzen [4].

Messungen der 1D-Subbandabstände lieferten Werte von einigen meV. Zur weiteren Charakterisierung wurden Magnetotransportuntersuchungen bei 106K, 136K und 175K durchgeführt. Dabei verschwinden die SdH Oszillationen, die bei tiefen Temperaturen auftreten, dafür zeigen sich bei 106K Strukturen im Widerstand, die bei 136K am stärksten ausgeprägt sind und bei 175K wieder schwächer werden [5].

Der Probenwiderstand nimmt mit steigender Temperatur stark ab, was nicht alleine durch die steigende Elektronendichte, sondern durch die Abschwächung der Coulombstreuung an geladenen Störstellen in der Wand der Wires erklärt werden kann.

Die Widerstandsmaxima können durch Streuung an Magnetophononen erklärt werden. Mit steigender Temperatur nimmt die Phononenzahl und damit die Streurrate zu, bis die Strukturen durch die hohe Streurrate verbreitern und oberhalb von 175K wieder verschwinden. Aus der Lage der Maxima der Magnetophononenstreuung lassen sich die Subbandabstände auch für Proben berechnen, die bei tiefen Temperaturen im extremen Quantenlimit sind. Bei höheren Temperaturen ergeben sich höhere Werte für die Subbandenergien, da sich die Elektronen nicht mehr nur im untersten Subband aufhalten, also weniger stark lokalisiert sind und dadurch das Potential des Wires weniger abschirmen.

Im 2D oder Bulkmaterial zeigen sich Magnetophononeffekte meist erst in der zweiten Ableitung des Widerstands nach dem Magnetfeld. Hier konnten derartige Effekte erstmals direkt gemessen werden, was darauf hinweist, daß in 1D-Systemen dieser Streumechanismus stärker als in 2D oder 3D-Systemen auftritt.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Köck, E. Gornik, M. Hauser und W. Beinstingl, Appl. Phys. Lett. **57**, 2327 (1990)
- [2] E.S. Alves, P.H. Beton, M. Henini, L. Eaves et al., J. Phys. C. **1**, 8257 (1989)
- [3] R. Fleischmann et al., Phys. Rev. Lett. **68**, 2790 (1992)
- [4] Ch. Wirner, Dissertation (1993), WSI München
- [5] J. Smoliner, G. Berthold, M. Hauser, C. Wirner, E. Gornik et al., erscheint in Semicond. Sci. Technol.