

Michael Szelong: Ballistische und hydrodynamische Vollwellengleichrichtung in nanoskaligen elektronischen GaAs/AlGaAs Kreuzstrukturen

Vollwellengleichrichter sind elektronische Schaltungen, die ein Wechselsignal in ein Gleichsignal umwandeln und in Netzteilen zur Leistungsübertragung oder in der Signalverarbeitung beispielsweise in Empfangsmodulen verwendet werden, die auch kleinste Signale detektieren müssen. Sie basieren auf barrierebehafteten Bauelementen wie der Diode, zum Beispiel im Dioden-Brückengleichrichter. Aufgrund der Barriere entsteht in passiven Schaltungen ohne Versorgungsspannung eine tote Zone im Übertragungsverhalten, was bedeutet, dass Signale unterhalb eines Schwellenwerts (zweifache Diodenspannung, bei Siliziumdioden ca. 1.2 V) gar nicht verarbeitet werden, oder es ist eine Versorgungsspannung für Hilfsschaltungen zur Beseitigung dieser toten Zone notwendig. Wünschenswertes Ziel ist ein Gleichrichterbauelement, welches beide Vorteile kombiniert, also ohne Versorgungsspannung auskommt und dabei gleichzeitig kleinste Signale verarbeiten kann.

Eine Basis zum Erreichen dieses Ziels bilden hochbewegliche Elektronensysteme, in denen die mittlere freie Weglänge zwischen zwei Elektronenstößen viel größer als die geometrischen Abmessungen eines Bauelements ist und Elektronen ähnlich Billardkugeln ihrem Impuls folgend nur an den Bauelementrändern reflektiert werden. In diesem sogenannten trägheitsballistischen Transportregime bestimmt die Bauelementgeometrie dessen Übertragungsverhalten und für eine Gleichrichtung ist ein Symmetriebruch in einem sonst symmetrischen vierpoligen Wellenleiterkreuz notwendig. Dies wurde bereits anhand der Gleichrichtung durch ein streuendes Element in der Kreuzungsstelle, welches Elektronen stets in dieselbe Richtung ablenkt, oder durch Anwinkeln der gegenüberliegenden Zweige des Kreuzes, welche dem Elektronenimpuls eine gleichrichtende Vorzugsrichtung mitgeben, gezeigt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei weitere Gleichrichtungsmechanismen gefunden und genauer untersucht. Zum Ersten wird die Analogie zwischen ballistischen Elektronen und Licht ausgenutzt und werden symmetriebrechende refraktive Elektronengebiete unterschiedlicher Dichte definiert, welche Elektronen in dieselbe Richtung ablenken. Zum Zweiten wird der Symmetriebruch mit einem statischen Magnetfeld realisiert, welches ballistische Elektronen aufgrund der Lorentzkraft in dieselbe Richtung ablenkt. Zum Dritten wird in Analogie zur Hydrodynamik klassischer Fluide und Gase ein hydrodynamisches Elektronensystem realisiert, in dem ein elektrischer Venturi-Effekt ohne jegliche geometrische Symmetriebrechung zu einer Gleichrichtung führt. Alle drei Mechanismen verbindet die im Laufe der Arbeit auftauchende Fragestellung, in welchem Transportregime sich die identischen hochbeweglichen Elektronensysteme befinden: Trägheitsballistik oder Hydrodynamik.

Die hochbeweglichen Elektronensysteme befinden sich in Heterostrukturen an der Grenzfläche zweier Halbleiter unterschiedlicher Bandlücke. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Bauelemente eigens am PC entworfen, im Reinraum in einer Kombination aus optischer und Elektronenstrahl-Lithografie und folgendem nasschemischem Ätzen aus den Heterostrukturen hergestellt und eine steuerbare Elektronendichte durch eine via Elektronenstrahlverdampfung abgeschiedene Top-Gate Elektrode realisiert. Das Übertragungsverhalten der Bauelemente wird mit Wechsel- und Gleichstrommesstechnik unter anderem dichte-, temperatur- und magnetfeldabhängig untersucht.

Es wird gezeigt, dass das Vorzeichen der Ausgangsspannung mit den Mechanismen der Elektronenoptik sowie der magnetischen Ablenkung in kontrollierter Weise umgeschaltet werden kann, während es beim elektrischen Venturi-Effekt stets positiv ist. Als repräsentativer Parameter für die Gleichrichtungseffizienz beträgt der maximale Transferwiderstand 220 Ω bei der Elektronenoptik, 2 Ω bei der magnetischen Ablenkung und 80 Ω beim Venturi-Effekt, was ersteren als vielversprechendsten Effekt für technische Anwendungen erscheinen lässt. Darüber hinaus wird gezeigt, dass sich das trägheitsballistische und hydrodynamische Transportregime überschneiden und alle Bauelemente dieser Arbeit auch hydrodynamisches Verhalten zeigen, was die Interpretation von bisher in der Literatur untersuchten trägheitsballistischen Effekten in ein neues Licht rückt.