

Diss. ETH ex. 3

Diss. ETH No. 11077

Multidimensional Analysis of Galvanomagnetic Effects in Magnetotransistors

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
CONCETTA RICCOBENE
Dottore in Fisica, Universitá agli Studi di Catania
born 19 March 1963
citizen of Italy

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. Baltes, supervisor
Prof. Dr. W. Fichtner, co-examiner

1995



Copyright ©1995 by Concetta Riccobene, Physical Electronics Laboratory

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the copyright holder.

Published by:

Physical Electronics Laboratory
Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich
ETH Hönggerberg, HPT
CH-8093 Zurich
Switzerland

ISBN: 3-907574-08-7

Printed in Switzerland

Abstract

Magnetotransistors are silicon microtransducers which convert a magnetic measurand into a useful electric signal. They are fabricated with standard integrated circuit (IC) technologies and may be applied in process control, automation, automotive systems, consumer products.

Theory and experiment indicate that the multi-collector magnetotransistors produce a differential output current whose magnitude is proportional to the magnetic induction applied at the chip surface. However, up to now the details of the sensor operation were not understood and sensor design had to be achieved by trial and error rather than by systematic design rules.

To gain insight which phenomena primarily determine the magnetic field sensitivity and which parasitic effects deteriorate the device performance, we studied the galvanomagnetic carrier transport by exact numerical simulation.

In contrast to previous work, the entire device structure has been modeled under general operating conditions, proper boundary conditions, and taking into account all the pertinent physical effects.

Our simulations demonstrate that, in the case of the vertical magnetotransistors, it is essentially the much disputed *emitter injection modulation* effect which is decisive for the sensor response. In the case of the lateral transistors, our results reveal that the sensitivity is predominantly determined by *minority-carrier deflection*, though an interplay of side effects is involved as well.

We present numerical simulations of the operation and performance of various dual-collector magnetotransistor structures differing in design and fabrication process. For each structural variant, we analyze the trade-off between high magnetic sensitivity and efficient suppression of parasitic effects causing noise and undesirable power consumption. As a result of our study, we suggest two unconventional device modifications as especially promising solutions to the optimization problem. In the first, the parasitic transistor is eliminated by anisotropically etching the substrate region; in the second, realized in Silicon On Insulator (SOI) technology, the parasitic transistor is prevented by design.

For many device structures an approximate two-dimensional (2D) treatment proves to be sufficient, but full three-dimensional (3D) analysis is essential for devices whose contact areas differ widely. This reveals the problem of current calibration inherent in two-dimensional approximations of devices with truly three-dimensional geometries.

In addition, a three-dimensional numerical analysis is mandatory for the study of *vector sensors*, i.e., devices sensing not only the intensity of the magnetic field, but also the components along the spatial directions.

We thus implemented, for the first time, the three-dimensional galvanomagnetic transport vector equations in a state-of-the-art general purpose device simulator.

Compendio

I magnetotransistor sono microtransduttori al silicio capaci di convertire una grandezza magnetica in un segnale elettrico utilizzabile. Sono fabbricati con una tecnologia standard per circuiti integrati (IC) e trovano applicazione in processi di controllo, in sistemi di automazione ed in prodotti di consumo.

Teoria e pratica mostrano entrambi che i magnetotransistor a piú collettori producono un'uscita differenziale in corrente la cui ampiezza è proporzionale all'induzione magnetica applicata alla superficie del chip. Però, a tutt'oggi, i dettagli del funzionamento del sensore non sono stati chiariti, e l'ottimizzazione del sensore viene fatta per approssimazioni successive, piuttosto che in base a sistematiche regole di design.

Per capire quale fenomeno determina principalmente la sensitività magnetica del sensore e quali sono gli effetti parassiti che deteriorano le prestazioni del dispositivo, abbiamo studiato il trasporto galvanomagnetico dei portatori per mezzo di simulazioni numeriche.

Diversamente da quanto avveniva in passato, abbiamo simulato il dispositivo nella sua totale estensione geometrica, ed abbiamo tenuto conto di tutti gli effetti fisici pertinenti al problema.

Le nostre simulazioni mostrano che, nel caso del magnetotransistor verticale, è essenzialmente la *modulazione nell'iniezione dell'emettitore* ad essere decisiva per la risposta del sensore. Nel caso del magnetotransistor laterale, invece, la sensitività è determinata maggiormente dalla *deflessione che i portatori minoritari subiscono nella regione di base*, sebbene siano presenti anche

altri fenomeni secondari.

In questo lavoro presentiamo un'analisi sistematica del principio di funzionamento e delle prestazioni di diversi tipi di magnetotransistor a piú collettori, che differiscono tra loro nel disegno e nel processo di fabbricazione usato per realizzarli. Per ciascuna variante analizziamo il compromesso tra buona sensitività magnetica ed efficiente eliminazione degli effetti parassiti causanti rumore ed elevato consumo di potenza di alimentazione. Come risultato del nostro studio, proponiamo due inconsuete modifiche rispetto al dispositivo standard originale come promettenti soluzioni al problema dell'ottimizzazione del dispositivo. Nella prima soluzione il transistor parassita è eliminato per mezzo di etching anisotropico. Nella seconda soluzione, realizzata con tecnologia SOI (Silicon On Insulator), la formazione del transistor parassita è prevenuta dalla stessa tecnologia usata.

Per molte delle strutture presentate, l'approssimazione numerica bidimensionale (2D) risulta sufficiente, ma per altri dispositivi la completa analisi tridimensionale (3D) è indispensabile. Tra questi ci sono i dispositivi i cui contatti differiscono ampiamente in profondità. Questa condizione determina il problema della calibrazione delle correnti, implicito in ogni semplificazione bidimensionale di un dispositivo avente una geometria intrinsecamente tridimensionale.

Inoltre la simulazione numerica a tre dimensioni è indispensabile per lo studio dei *sensori vettoriali*, cioè per quei dispositivi in grado di rilevare oltre all'intensità del campo magnetico, anche la sua orientazione spaziale.

Per questo motivo, per la prima volta, abbiamo implementato all'interno di un avanzato simulatore di dispositivi le equazioni del trasporto con campo magnetico in tre dimensioni.