IEEE MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES SOCIETY

The Microwave Theory and Techniques Society is an organization, within the framework of the IEEE, of members with principal professional interests in the field of microwave theory and techniques. All members of the IEEE are eligible for membership in the Society and will receive this TRANSACTIONS upon payment of the annual Society membership fee of $14.00 plus an annual subscription fee of $20.00. For information on joining, write to the IEEE at the address below. *Member copies of Transactions/Journals are for personal use only.*

ADMINISTRATIVE COMMITTEE

M. J. SCHINDLER, *President* R. J. TREW, *Vice President* N. J. KOLIAS, *Secretary* J. S. KENNEY, *Treasurer*

M. P. DE LISO, S. M. EL-GHAZALY, K. C. GUPTA, M. HARRIS, J. HAUSNER, K. HONJO, L. KATEHI, S. KAWASAKI, J. S. KENNEY, D. LOVELACE, J. MODELSKI, V. J. NAIR, B. PERLMAN, J. M. POND, M. J. SCHINDLER, W. SHIROMA, R. SORRENTINO, G. THOREN, R. J. TREW, K. VARIAN, S. WETENKAMP

Honorary Life Members

S. B. COHN, T. ITOH, A. A. OLINER, T. S. SAAD, K. TOMIYASU, L. YOUNG

Distinguished Lecturers

F. ALI, P. ASBECK, L. DAVIS, H. J. DE LOS SANTOS, W. GWAREK, W. HEINRICH, A. KATZ, G. REBEIZ, C. SCHAFFER, A. J. SEEDS, R. TREW, R. WEIGEL

Past Presidents

J. T. BARR IV (2002), C. M. JACKSON (2001), R. W. SUDBURY (2000)

MTT-S Chapter Chairs

Albuquerque: G. WOOD
Atlanta: J. KEMP
Austria: R. WEIGEL
Baltimore: B. MCCARTHY
Beijing: Y.-R. ZHONG
Belarus: S. MALYSHEV
Benelux: B. NAUWELAERS
Buffalo: M. R. GILLETTE
Bulgaria: F. FILIPOV
Central Iowa/Cedar Rapids: D. JOHNSON
Central New England/Boston: T. COSTAS
Central & South Italy: R. TIBERIO
Chicago: R. KOLLMAN
Cleveland: M. TABIB-AZAR
College Station: K. MICHALSKI
Columbus: C. C. CHEN
Croatia: J. BARTOLIC
Czech/Slovakia: Z. RAIDA
Dallas: P. WINSON
Dayton: A. TERZOULI, JR.
Denver: K. BOIS
East Ukraine: A. KIRILENKO
Egypt: I. SALEM
Finland: T. KARTTAAVI
Florida West Coast: S. O'BRIEN
Foothill: C. ANTONIAK
France: O. PICCON
Germany: W. HEINRICH
Greece: I. XANTHAKIS
Hong Kong: L. K. MAN
Houston: J. WILLIAMS
Hungary: T. BERCELI
Huntsville: M. BARNES
India: K. S. CHARI
Israel: A. MADJAR
Japan: Z. KYO
Kiev: Y. POPLAVKO
Kitchener-Waterloo: R. MANSOUR
Lithuania: I. NAIDIONOVA
Long Island/New York: M. HANCZOR
Los Angeles: T. LEE
Malaysia: D. GHODGAONKAR
Melbourne: R. BOTSFORD
Milwaukee: G. HANSON
Mohawk Valley: E. P. RATAZZI
Montreal: K. WU
Moscow: V. A. KALOSHIN
Nanjing: W. X. ZHANG
New Hampshire: D. RYAN
New Jersey: K. DIXIT
New Jersey Coast: S. PRASANNA
New South Wales: T. BIRD
Nizhny: Y. BELOV
North Italy: G. GHIONE
North Queensland: J. MAZIERSKA
Northern Nevada: B. RAWAT
Novosibirsk: V. SHUVALOV
Oregon: T. RUTTAN
Orlando: T. WU
Ottawa: J. ROY
Philadelphia: J. LAW
Phoenix: B. KIM
Poland: M. MROZOWSKI
Portugal: J. FREIRE
Princeton/Central Jersey: P. PALENA
Queensland: M. BIALKOWSKI
Republic fo Georgia: R. ZARIDZE
Rio de Janeiro: J. R. BERGMANN
Rochester: F. POLO
Saint Louis: D. MACKE
Saint Petersburg: M. SITNIKOVA
San Diego: U. DHALIWAL
San Fernando: S. SWIFT
Santa Clara: J. SANFORD
Saratov-Penza: M. V. DAVIDOVICH
Seattle: T. RASCHKO
Seoul: S. W. YUN
Singapore: L. W. LI
South Africa: J. JOUBERT
South Australia: B. BATES
South Brazil: L. KRETLEY
Southeastern Michigan: L. M. ANNEBERG
Spain: L. DE-HARO
Springfield: S. C. REISING
Sweden: J. JOHANSSON
Switzerland: R. VAHLDIECK
Syracuse: E. ARVAS
Taipei: C. LU
Thailand: V. VIVEK
Tomsk: D. GOLODIN
Toronto: R. ABHARI
Tucson: A. KWAN
Turkey: L. GUREL
Twin Cities: M. J. GAWRONSKI
U.K.: A. REZAZADEH
Venezuela: A. N. BIANCHI
Victoria: A. MITCHELL
Vinnitsya: P. MOLCHANOV
Virginia Mountain: D. MILLER
Washington DC/Northern Virginia: R. SUTTON
West Ukraine: M. ANDRIKYCHUK
Winnipeg: J. LOVETRI
Yugoslavia: A. MARINCIC

Editor

MICHAEL STEER
North Carolina State Univ.
Raleigh, NC 27695-7911 USA
Phone: +1 919 515 5191
Fax: +1 919 513 1979
email: mtteditor@ncsu.edu

Associate Editors

WOLFGANG MENZEL, Univ. of Ulm, Germany, email: wolfgang.menzel@ieee.org
ANTTI RAISANEN, Helsinki Univ. of Technol., Finland, email: antti.raisanen@hut.fi
BUMMAN KIM, Pohang Univ. Sci. Technol., Korea, email: bmkim@postech.ac.kr
DYLAN F. WILLIAMS, NIST, USA, email: dylan@ieee.org
RANDY LEHMANN, TriQuint Semiconductor, USA, email: rlehmann@tqtx.com

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.

Officers

MICHAEL S. ADLER, *President*
ARTHUR W. WINSTON, *President-Elect*
LEVENT ONURAL, *Secretary*
PEDRO A. RAY, *Treasurer*
RAYMOND D. FINDLAY, *Past President*
JAMES M. TIEN, *Vice President, Educational Activities*
MICHAEL R. LIGHTNER, *Vice President, Publication Services and Products*
W. CLEON ANDERSON, *Vice President, Regional Activities*
GERALD H. PETERSON, *President, IEEE Standards Association*
LEAH H. JAMIESON, *Vice President, Technical Activities*
JAMES V. LEONARD, *President, IEEE-USA*
HAROLD L. FLESCHER, *Director, Division IV — Electromagnetics and Radiation*

Executive Staff

DANIEL J. SENESE, *Executive Director*

DONALD CURTIS, *Human Resources*
ANTHONY DURNIAK, *Publications Activities*
JUDITH GORMAN, *Standards Activities*
CECELIA JANKOWSKI, *Regional Activities*
BARBARA COBURN STOLER, *Educational Activities*
MATTHEW LOEB, *Corporate Strategy & Communications*
RICHARD D. SCHWARTZ, *Business Administration*
W. THOMAS SUTTLE, *IEEE-USA*
MARY WARD-CALLAN, *Technical Activities*
JOHN WITSKEN, *Information Technology*

IEEE Periodicals
Transactions/Journals Department

Staff Director: FRAN ZAPPULLA
Editorial Director: DAWN MELLEY
Production Director: ROBERT SMREK
Managing Editor: MONA MITTRA
Senior Editor: CHRISTINA M. REZES

IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES (ISSN 0018-9480) is published monthly by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Responsibility for the contents rests upon the authors and not upon the IEEE, the Society/Council, or its members. **IEEE Corporate Office:** 3 Park Avenue, 17th Floor, New York, NY 10016-5997. **IEEE Operations Center:** 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331. **NJ Telephone:** +1 732 981 0060. **Price/Publication Information:** Individual copies: IEEE Members $10.00 (first copy only), nonmember $20.00 per copy. (Note: Add $4.00 postage and handling charge to any order from $1.00 to $50.00, including prepaid orders.) Member and nonmember subscription prices available upon request. Available in microfiche and microfilm. **Copyright and Reprint Permissions:** Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy for private use of patrons, provided the per-copy fee indicated in the code at the bottom of the first page is paid through the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923. For all other copying, reprint, or republication permission, write to Copyrights and Permissions Department, IEEE Publications Administration, 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331.

Copyright © 2003 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. All rights reserved.

Periodicals Postage Paid at New York, NY and at additional mailing offices. **Postmaster:** Send address changes to IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, IEEE, 445 Hoes Lane, P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331. GST Registration No. 125634188. Printed in U.S.A.

EDITORIAL BOARD

Editor: M. STEER

Associate Editors: W. MENZEL, A. RAISANEN, B. KIM, D. F. WILLIAMS, R. LEHMANN

REVIEWERS

A. Abbaspour
M. Abouzahra
A. Abramowicz
H. Ahn
M. Aidam
M. Aikawa
C. Aitchison
I. Aksun
B. Albinsson
F. Alessandri
W. Ali-Ahmad
F. Alimenti
P. Alinikula
B. Allen
A. Alphones
A. Altintas
A. Alvarez
S. Amari
Y. Antar
M. Anwar
I. Aoki
R. Aparicio
J. Archer
P. Arcioni
F. Arndt
U. Arz
Y. Asano
A. Atia
N. Audeh
I. Awai
Y. Ayasli
A. Aydiner
W. Baechtold
I. Bahl
S. Bajpai
J. Baker-Jarvis
R. Bansal
D. Barataud
F. Bardati
I. Bardi
S. Barker
F. Barnes
B. Bates
B. Bayraktaroglu
C. Beaulieu
K. Beilenhoff
B. Beker
T. Berceli
P. Berg
M. Berroth
G. Bertin
A. Beyer
K. Bhasin
P. Bhattacharya
M. Bialkowski
E. Biebl
F. Bilotti
T. Bird
D. Blackham
P. Blondy
R. Blundell
D. Bodnar
F. Boegelsack
R. Boix
E. Borie
J. Bornemann
H. Boss
C. Bostian
S. Bousnina
V. Bratman
W. Bridges
T. Brookes
A. Brown
E. Brown
D. Budimir
T. Budka
C. Buntschuh
J. Butler
J. Cabanillas
M. Calcatera
C. Caloz
E. Camargo
R. Cameron
C. Campbell
R. Campbell
M. Campovecchio
A. Cangellaris
F. Canning
S. Caorsi
G. Carchon
R. Carter
R. Caverly
H. Chaloupka
C. Chan
F. Chang
K. Chang
H. Chapell
B. Chappell
W. Chappell
K. Chatterjee
G. Chattopadhyay
S. Chaudhuri
C. Chen
F. Chen
J. Chen
W. Chen
Y. Chen
Z. Chen
M. Cheng
C. Chi
Y. Chiang
Y. Chow
C. Christopoulos
A. Cidronali
C. Clark
J. Cloete
E. Cohen
L. Cohen
B. Collin
O. Collins
F. Colomb
B. Colpitts
H. Contopanagos
E. Costamagna
A. Costanzo
C. Courtney
J. Cowles
Y. Coz
H. Cronson
D. Cros
R. Culbertson
W. Curtice
F. Danneville
A. Daryoush
B. Das
B. Davis
L. Davis
B. Deal
A. Dec
J. Deen
J. Dees
J. DeFalco
M. DeLisio
P. deMaagt
E. Denlinger
R. Deroo
M. DeVincentis
D. DeZutter
R. Diaz
L. DiDomenico
A. Djordjevic
J. Doane
J. Dobrowolski
S. Duffy
L. Dussopt
A. Duzdar
S. Dvorak
T. Eibert
H. Eisele
G. Eleftheriades
F. Ellinger
T. Ellis
N. Engheta
N. Erickson
L. Escotte
J. Everard
C. Fager
D. Fang
J. Fang
A. Fathy
M. Feldman
A. Fernandez
A. Ferrero
I. Fianovsky
J. Fiedziuszko
H. Figueroa
J. Fikioris
I. Filanovsky
R. Fischer
K. Foster
G. Franceschetti
F. Frezza
I. Frigyes
M. Fujii
V. Fusco
G. Gabriel
T. Gaier
O. Gandhi
M. Garcia
J. Garcinuno
R. Garg
R. Garver
C. Gee
B. Geller
G. Gentili
E. Gerecht
F. German
S. Gevorgian
R. Geyer
G. Ghione
D. Ghodgaonkar
A. Gibson
R. Gillard
B. Gimeno
V. Giordano
M. Goano
M. Goldfarb
P. Goldsmith
A. Gopinath
R. Gordon
G. Gragnani
L. Gragnani
B. Grant
G. Grau
I. Gresham
D. Griffith
D. Grischowsky
C. Grossman
T. Grzegorczyk
K. Gundlach
K. Gupta
R. Gupta
F. Gustrau
R. Gutmann
B. Guy
W. Gwarek
S. Hagness
D. Halchin
P. Hall
D. Ham
J. Han
G. Hanson
L. Hao
H. Hasegawa
M. Hashimoto
T. Hashimoto
G. Hau
H. Hayashi
L. Hayden
I. Hecht
E. Hegazi
W. Heinrich
G. Heiter
H. Hejase
P. Herczfeld
M. Herman
J. Herren
K. Herrick
R. Hicks
M. Hieda
A. Higgins
D. Hill
T. Hirono
T. Hirvonen
M. Hoffmann
R. Hoffmann
J. Hong
W. Hong
K. Honjo
D. Hornbuckle
T. Horng
B. Housmand
J. Howard
R. Hsia
D. Huebner
Y. Huiwen
C. Hung
I. Hunter
I. Huynen
J. Hwang
K. Hwang
N. Ida
T. Idehara
A. Iida
O. Ishida
T. Ishizaki
K. Ito
K. Itoh
T. Itoh
C. Iversen
J. Gallop
D. Jablonski
C. Jackson
D. Jackson
R. Jackson
A. Jacob
M. Jacob
H. Jacobsson
D. Jaeger
S. Jaganathan
N. Jain
G. James
M. Janezic
S. Jeng
M. Jensen
T. Jerse
W. Joines
S. Jones
J. Joubert
J. Juntunen
P. Kabos
M. Kahrs
D. Kajfez
B. Kalinikos
E. Kamenetskii
H. Kamitsuna
S. Kanamaluru
P. Kangaslahtii
R. Karumudi
T. Kashiwa
R. Kaul
M. Kazimierczuk
R. Keam
S. Kee
S. Kenney
A. Kerr
O. Kesler
A. Khanna
A. Khebir
J. Kiang
I. Kim
R. King
T. Kitamura
T. Kitazawa
M. Kivikoski
R. Knochel
L. Knockaert
P. Koert
T. Koike
T. Kolding
N. Kolias
J. Komiak
A. Komiyama
G. Kompa
B. Kormanyos
M. Koshiba
J. Kot
A. Kroenig
A. Kroening
C. Krowne
J. Krupka
H. Kubo
S. Kudszus
B. Kuhn
W. Kuhn
M. Kumar
J. Kuno
J. Kuo
Y. Kwon
S. Kyriazidou
E. Laermans
I. Lager
Y. Lai
A. Lakhtakia
G. Lange
U. Langmann
G. Lapin
S. Lardizabal
C. Larose
L. Larson
J. Laskar
E. Laurent
J. Laurin
J. Lee
R. Lee
R. Lehmensiek
R. Leoni
R. Levy
G. Li
L. Li
Y. Li
L. Ligthart
E. Lil
C. Lin
J. Lin
W. Lin
C. Ling
H. Ling
D. Linkhart
V. Litvinov
G. Liu
Q. Liu
O. Llopis
R. Loison
K. Lonngren
U. Lott
D. Lovelace
D. Lu
K. Lu
S. Lu
S. Lucyszyn
N. Luhmann
K. Luk
S. Luo
J. Luy
M Jacob
Z. Ma
P. Maagt
S. Maas
M. Madihian
A. Madjar
S. Mageur
S. Mahmoud
M. Majewski
M. Makimoto
J. Malherbe
D. Malocha
L. Maloratsky
V. Manasson
C. Mann
R. Mansour
R. Marques
S. Marsh
D. Masse
M. Mastrapasqua
A. Materka
A. Matsushima
G. Matthaei
P. Mayer
J. Mazierska
J. Mazur
G. Mazzarella
D. McDermott
D. McPherson
F. Medina
K. Mei
H. Meier
F. Mesa
A. Mickelson
E. Miller
R. Minasian
D. Mirshekar
R. Mishra
A. Mitchell
T. Miura
M. Miyazaki
T. Miyoshi
K. Mizuno
S. Mizushina
S. Mohammadi
M. Mongiardo
C. Moore
J. Morente
A. Morini
E. Moros
A. Mortazawi
A. Moulthrop
M. Mrozowski
M. Muraguchi
N. Mysoor
K. Naishadham
A. Nakayama
S. Nam
T. Namiki
B. Nauwelaers
J. Navarro
D. Neikirk
E. Newman
H. Newman
E. Ngoya
C. Nguyen
S. Nightingale
A. Niknejad
N. Nikolova
K. Nikoskinen
M. Nisenoff
T. Nishikawa
G. Niu
S. Nogi
A. Nosich
K. Noujeim
D. Novak
J. Obregon
T. Ohira
Y. Okamura
A. Oki
M. Okoniewski
A. Oliner
A. Omar
M. Omiya
S. Ortiz
K. Osafune
J. Osepchuk
C. Pan
S. Pan
Y. Pan
J. Papapolymerou
S. Parisi
H. Park
W. Park
T. Parker
R. Parry
D. Pasalic
C. Paul
A. Pavio
D. Pavlidis
J. Pearce
W. Pearson
J. Pedro
J. Pereda
O. Pereira
L. Perregrini
M. Petelin
W. Petersen
A. Peterson
H. Pickett
B. Piernas
P. Pieters
M. Pirola
W. Platte
C. Pobanz
R. Pollard
Z. Popovic
M. Pospieszalski
V. Postoyalko
N. Pothecary
S. Prasad
D. Prather
R. Pregla
D. Prescott
S. Pritchett
Y. Qian
R. Quere
V. Radisic
M. Raffetto
R. Raghuram
C. Railton
O. Ramahi
S. Raman
J. Randa
R. Ranson
C. Rappaport
J. Raskin
C. Rauscher
J. Rautio
J. Rayas
J. Rebel
R. Reid
J. Reinert
R. Remis
K. Remley
S. Rengarajan
A. Reynoso
N. Ribiere
G. Riblet
A. Riddle
J. Rizk
I. Robertson
P. Roblin
A. Rodriguez
M. Rodwell
R. Rogers
R. Rojas
Y. Rong
D. Root
L. Roselli
U. Rosenberg
E. Rothwell
J. Roumeliotis
T. Rozzi
A. Rudiakova
M. Rudolph
P. Russer
A. Rydberg
C. Saavedra
L. Sadovnik
A. Safwat
M. Sagawa
P. Saha
J. Sahalos
A. Sanagavarapu
A. Sangster
H. Santos
P. Savi
S. Savov
S. Sawa
K. Sawaya
J. Schellenberg
M. Schetzen
B. Schiek
M. Schlechtweg
E. Schloemann
L. Schmidt
D. Schmitt
J. Schneider
D. Schreurs
R. Schuhmann
V. Schulz
H. Schumacher
J. Schutt-Aine
F. Schwering
H. Serizawa
R. Settaluri
J. Shafii
O. Shanaa
G. Shaw
D. Sheen
X. Sheng
T. Shibata
H. Shigesawa
Y. Shih
D. Shin
T. Shiozawa
M. Shirokov
W. Shiroma
D. Sievenpiper
B. Sigmon
K. Silvonen
W. Simbuerger
Z. Skvor
G. Smith
P. Smith
R. Smith
C. Snowden
R. Snyder
H. Sobol
N. Sokal
M. Solal
M. Solomon
M. Sorolla Ayza
R. Sorrentino
D. Staiculescu
J. Stake
J. Staudinger
P. Stauffer
M. Steer
J. Stenarson
M. Stern
S. Stitzer
B. Strassner
M. Stubbs
M. Stuchly
D. Sullivan
B. Szendrenyi
T. Shen
W. Tabbara
A. Taflove
T. Tamir
K. Tan
K. Tanaka
W. Tang
R. Tascone
J. Tauritz
F. Teixeira
M. Tentzeris
K. Thakur
H. Thal
W. Thiel
B. Thielen
M. Thumm
W. Tinga
G. Tkachenko
M. Tofighi
B. Toland
K. Tomiyasu
E. Tong
A. Toscano
M. Toupikov
V. Trenkic
B. Trew
C. Trueman
A. Truitt
J. Tsalamengas
M. Tsuji
M. Tsutsumi
J. Tuovinen
C. Tzuang
K. Uchida
T. Ueda
J. Uher
A. Uhlir
T. Uno
T. Uwano
N. Uzunoglu
W. van der Voort
G. Vandenbosch
D. Vanhoenacker
L. Vegni
I. Vendik
S. Verdeyme
V. Veremey
S. Verghese
J. Verspecht
C. Vittoria
R. Voelker
J. Volakis
J. Vuolevi
K. Wakino
P. Waldow
T. Walid
C. Wang
S. Wang
W. Wang
Y. Wang
K. Warnick
D. Webb
J. Webb
K. Webb
R. Webster
S. Wedge
C. Wei
L. Wei
D. Weide
B. Weikle
C. Weil
A. Weily
S. Weinreb
J. Weiss
A. Weisshaar
C. Weitzel
T. Weller
J. Wenger
S. Wentworth
R. Wenzel
S. Wetenkamp
J. Whitaker
W. Wiesbeck
G. Wilkins
D. Williams
A. Williamson
J. Wiltse
P. Winson
D. Wittwer
K. Wong
T. Wong
G. Woods
G. Wu
K. Wu
R. Wu
T. Wu
Y. Wu
G. Xiao
H. Xin
Y. Xu
H. Yabe
A. Yakovlev
D. Yang
H. Yang
Y. Yang
H. Yano
H. Yao
K. Yashiro
K. Yeo
S. Yeo
S. Yngvesson
E. Yoon
B. York
A. Young
L. Young
P. Yu
K. Zaki
J. Zamanillo
J. Zapata
J. Zehentner
Q. Zhang
R. Zhang
X. Zhang
L. Zhu
Y. Zhu
H. Zirath
S. Zouhdi
J. Zurcher