



International Technology Roadmap for Semiconductors

2005 Edition

共 編：

欧州半導体産業協会 (ESI, European Semiconductor Industry Association)
(社)電子情報技術産業協会 (JEITA, Japan Electronics and Information Technology Industries Association)
韓国半導体産業協会 (KSIA, Korea Semiconductor Industry Association)
台湾半導体産業協会 (TSIA, Taiwan Semiconductor Industry Association)
米国半導体工業会 (SIA, Semiconductor Industry Association)

原文(英文)著作権： 米国半導体工業会 (SIA)

日本語版翻訳：(社)電子情報技術産業協会 半導体技術ロードマップ専門委員会

版權について

ORIGINAL (ENGLISH VERSION) COPYRIGHT © 2005 SEMICONDUCTOR INDUSTRY ASSOCIATION

All rights reserved

ITRS • 2706 Montopolis Drive • Austin, Texas 78741 • 512.356.7687 • <http://public.itrs.net>

Japanese translation by the JEITA, Japan Electronics and Information Technology Industries Association
under the license of the Semiconductor Industry Association

- 引用する場合の注意 -

原文(英語版)から引用する場合： 2005 ITRS page XX, Figure(Table) YY

この和訳から引用する場合： 2005 ITRS JEITA 和訳 XX 頁,図(表)YY

と明記してください。

問合せ先：

社団法人 電子情報技術産業協会

半導体技術ロードマップ専門委員会 事務局

Tel: 03-3518-6430, <mailto:roadmap@jeita.or.jp>

謝辭 (ACKNOWLEDGMENTS)

INTERNATIONAL ROADMAP COMMITTEE

- ◆ *Europe*—Wolfgang Arden, Patrick Coge, Mart Graef, Gerhard Goltz
- ◆ *Japan*—Hidemi Ishiuchi, Toshihiko Osada
- ◆ *Korea*—Joo-Tae Moon, Hyun-Chul Sohn
- ◆ *Taiwan*—Mong-Song Liang, Chen-Hsi Lin, C.Y. Lu
- ◆ *U.S.A.*—Pushkar Apte, Bob Doering, Paolo Gargini

TECHNOLOGY WORKING GROUP KEY CONTRIBUTORS

Chip-Size/Technology Node Study Group—Alan Allan, Chris Case, Chi-Shih Chang, Walter Class, Bob Doering, Donald Edenfeld, Denis Fandel, David Jensen, Andrew Kahng, Fred Lakani, Harry Levinson, Chris Long, Jeff Pettinato, Shizuo Sawada, Luan C. Tran, Peter Zeitzoff

System Drivers and Design—Satoshi Akui, Ken Albin, Martin Anderson, Kanji Aoki, Larry Arledge, Yoshimi Asada, Kenji Asai, Woo-Hyun Baek, Bob Bentley, Kerry Bernstein, Valeria Bertacco, David Blaauw, Shawn Blanton, Ralf Brederlow, Mike Briere, Ben Brown, Ken Butler, Juan-Antonio Carballo, Mi-Chang Chang, C. Chen, Liang-Gee Chen, Young-Jung Choi, John Cohn, Don Cottrell, John Darringer, Hugo de Man, Stephane Donnay, Wolfgang Ecker, Dale Edwards, Yoshiharu Furui, Shinji Furuno, Jim Garrison, Sudhir Gowda, Carlo Guardiani, Hosam Haggag, Tamotsu Hiwatashi, Kelly A. Hopmeier, Mark Hsieh, Koichiro Ishibashi, Shih-Jie Jou, William Joyner, Andrew Kahng, Masaru Kakimoto, Haruhisa Kashiwagi, Stan Kaveckis, Jamil Kawa, Chang Kim, Chang-Hyun Kim, Jae-Suk Kim, Chi-Hau Kong, Victor Kravets, Dennis Lau, Seok-Joong Lee, C.C. Lee, Tsung-Hsien Lin, Gin-Kou Ma, Vinod Malhotra, Martin Margala, Grant Martin, Kazuya Masu, Masami Matsuzaki, Sury Maturi, Don McMillan, Anne Meixner, Y.N. Mo, Sharon Murray, Sani Nassif, Tomoji Nukiyama, Isao Okada, Nobuhiro Okano, Nobuto Ono, Sule Ozev, David Pan, Vijay Pitchumany, Carl Pixley, Daniel Purdy, John Rawlins, Bill Read, Kevin Redmond, John Rockway, Michael Rodgers, Wolfgang Rosenstiel, Toshitada Saito, Karem Sakallah, Joseph Sauerer, Jean-Pierre Schoellkopf, Peter Schwarz, Yahiro Shiotsuki, Gary Smith, Mani Soma, Leon Stok, Mikio Sumitani, Robert Taft, Tah-Kang Ting, Ryoichi Tomishige, Hiroki Tomoshige, Tadao Toyoda, Kunio Uchiyama, Maarten Vertregt, Piet Wambaq, Lawrence K Whitcomb, Jim Wieser, Bruce Wile, Alfred Wong, Ching-San Wu, Akihiro Yamada, Ichiro Yamamoto, David Yeh

Test and Test Equipment—Joong-Bae Ahn, Katsuhiko Aiyoshi, Joel Amtsfeld, Frank Anderson, Ken-ichi Anzou, Davide Appello, Dave Armstrong, Bassam Asfoor, Roger Barth, Vishwas Bhide, Mike Bienek, Dan Brija, Carl Buck, Scott Buckner, Yi Cai, Jwu E Chen, Paul Chen, Wei-ming Chi, Jeong-Ho Cho, Pat Cochran, Jack Courtney, Gordon Cowan, Guiseppe Paolo Crisenza, Dennis Eaton, Don Edenfeld, Mike Egloff, Kouichi Eguchi, Stefan Eichenberger, Michiaki Emori, Satoshi Fukumoto, Rudy Garcia, Anne Gattiker, Larry Gilg, Hosham Haggag, Mike Harris, Kazumi Hatayama, Ken Heiman, Klaus Dieter Hilliges, Masaki Hirano, Shigeyoshi Hirose, Hisao Horibe, Bernd Juling, Takayuki Katayama, Kyu-Cheul Kim, Takuya Kobayashi, Tomoaki Kobayashi, Jens Kober, John Lakoski, Matt Lauderdale, Chung Len Lee, Kuen-Jong Lee, Kwan-Jong Lee, Mike Li, C. S. Lin, Charles Lin, Michio Maekawa, Peter Maxwell, Mike Mayberry, Dan Meyer, Shinji Mori, Peter Muhmenthaler, Luis Muller, Oliver Nagler, Yasushi Nakajima, Udaya Natarajan, Pierpaolo Nicosia, Phil Nigh, Yasumasa Nishimura, Kazuya Noguchi, Akira Ooishi, Bill Ortner, Hideharu Ozaki, David Pfaff, Bill Price, Rochit Rajsuman, James Rhodes, Paul Roddy, Mike Rodgers, Charles Rothschild, Masayuki Sato, Yasuo Sato, Ulrich Schoettmer, Fayez Sedarous, Rene Segers, Meng Lieh Sheu, Lee Song, Chauchin Su, Hiroyoshi Suzuki, Tetsuo Tada, I Shih Tseng, J. S Tseng, Masanori Ushikubo, Jody Van Horn, Don Van Overloop, Robert van Rijsinge, Erik Volkerink, Larry Wagner, Hitoshi Watanabe, Burnie West, Tom Williams, Cheng Wen Wu, Wen Ching Wu, Osamu Yamada, Mitsuo Yamazaki, Daniel Yang, Wen Kun Yang, Raymond Yin, Yervant Zorian

Process Integration, Devices, and Structures—Yasushi Akasaka, Joe E. Brewer, C.P. Chao, Travis Chao, Osbert Cheng, S. C. Chien, James Chung, Simon Deleonibus, Theodore A. (Ted) Dellin, Carlos Diaz, Samuel K.H. Fung, J.C. Guo, Toshiro Hiramoto, Digh Hisamoto, Atsushi Hori, Ken Hsieh, W.Y. Hsieh, Margaret Huang, Jim Hutchby, Sung-Bo Hwang, Jiro Ida, Kiyotaka Imai, Young-Phil Kim, Tzu-Jae King, Dae-Hong Ko, Sang-Don Lee, Chia Wen Liang, Glen Lin, Y.T. Lin, Rich Liu, S.L. Lung, Mike Ma, Y.J. Mii, Naoki Nagashima, Takashi Nakamura, Tak H. Ning, Hidekazu Oda, Dong-Keun Park, Mark Rodder, Shizuo Sawada, Klaus Schrufer, Yee-Chaung See, Tae-Wook Seo, Kentaro Shibahara, Hun-Jong Shin, Riichiro Shirota, Thomas Skotnicki, Toshihiro Sugii, Yoshitaka Tadaki, Shuichi Tahara, Shinichi Takagi, Denny Tang, Luan C. Tran, Cheng taung Tsai, MJ Tsai, Ting S. Wang, Jason Woo, Chien Wu, Chung-Cheng Wu, Michael Wu, Qi Xiang, Geoffrey Yeap, Makoto Yoshimi, Peter Zeitzoff, Bin Zhao

Radio Frequency and Analog/Mixed-signal Technologies for Wireless Communications—Hideo Aoyagi, Herbert S. Bennett, Ralf Brederlow, Doug Coolbaugh, Julio Costa, Peter E. Cottrell, Stefaan Decoutere, Jim Dunn, Mark Fedasiuk, Ronald Grundbacher, Dave Halchin, Yoshihiro Hayashi, Erwin Hijzen, Digh Hisamoto, W. Margaret Huang, Anthony A. Immorlica, Jay John, Alvin Joseph, Takahiro Kamei, Tom Kazior, Yukihiro Kiyota,

2 Introduction

Dim-Lee Kwong, Minh Le, Victor Liang, David McQuiddy, Jan-Erik Mueller, Marco Racanelli, Bernard Sautreuil, Hisashi (Sam) Shichijo, H.C. Tseng, Chuck Weitzel, Ching-San Wu, Peter Zampardi, Bin Zhao, Herbert Zirath, John Zolper

Emerging Research Devices and Materials—Dimitri Antoniadis, Marc Baldo, Karl Berggren, Charles Black, Dawn Bonnell, George Bourianoff, Alex Bratkovski, Joe Brewer, John Carruthers, Sang Wook Cheong, Philippe Coronel, Supriyo Datta, Kristen De Meyer, Erik DeBenedictis, Simon Deleonibus, Alex Demkov, Steve Erwin, Michael Forshaw, Christian Gamrat, Michael Garner, Bruno Ghyselen, Jeff Grossman, Dan Hammerstrom, Daniel J.C. Herr, Toshiro Hiramoto, Susan Holl, James Hutchby, Berry Jonker, Ted Kamins, Richard Kiehl, Tsu-Jae King, Gerhard Klimeck, Zoran Krivokapic, Phil Kuekes, Louis Lome, Mark Lundstrom, Kathryn Moler, David Muller, Rama Muralidhar, Wei-Xin Ni, Tak Ning, Tobias Noll, Yuri Ponomarev, Muralidhar Ramachandran, Ramamoorthy Ramesh, Mark Reed, L. Rafael Reif, Lothar Risch, David A. Roberts, Vwani Roychowdhury, John Henry Scott, Sadasivan Shankar, Wei-Tsun Shiau, Kentaro Shibahara, Thomas Skotnicki, Morley Stone, Shinichi Takagi, Tom Theis, Jim Tour, Luan Tran, Rudolf M. Tromp, Ming-Jinn Tsai, Peter Varman, Eric Vogel, Kang Wang, Rainer Waser, Stan Williams, H.-S. Philip Wong, In Kyeong Yoo, Makoto Yoshimi, Peter Zeitzoff, Yuegang Zhang, Victor Zhirnov, Igor Zutic

Front End Processes—Khaled Ahmed, Mauro Alessandri, Michael Alles, Olli Anttila, Luis Aparicio, Leo Archer, Souvik Banerjee, Joel Barnett, Tom Bastein, Twan Bearda, Larry Beckwith, Ivan (Skip) Berry, Roberto Bez, Frederic Boeuf, Bill Bowers, George Brown, Murray Bullis, Mayank T. Bulsara, Ahmed Busnaina, Jeff Butterbaugh, George K. Celler, Cetin Cetinkaya, Juanita Chambers, David Chang, Kow-Ming Chang, Mark Chang, Tien-Sheng Chao, S. C. Chen, Victor Chia, Albert Chin, Luigi Columbo, Michael Current, Tim Dalton, Carlos H. Diaz, Anthony (Tony) Dip, Bruce Doris, Roxanne Dulas, Laszlo Fabry, Jeff Farber, Sue Felch, Graham Fisher, Hideaki Fujiwara, Nobuo Fujiwara, Michael Fury, Glenn W. Gale, Ernst Gaulhofer, Hans Gossmann, Dinesh C. Gupta, Martin Gutsche, Greg Higashi, Dick Hockett, Andrew Hoff, Harry Hovel, Daniel Huang, J. M. Huang, Ru Huang, Tiao-Yuan Huang, Howard Huff, Bill Hughes, Makarem Hussein, Huang-Tsung Hwang, Yoshikazu Ibara, Simon Jang, Bob Johnston, Mototaka Kamoshida, Ho-Kyu Kang, Sien Kang, Seiichiro Kawamura, Bruce Kellerman, Yung Kim, Brian Kirkpatrick, Hiroshi Kitajima, Martin Knotter, Mitsuo Kohno, Daniel Koos, Alex Ku, Michitaka Kubota, Paul Langer, Larry Larson, Jeff Lauerhaas, Jeong-Gun Lee, Kun-Tack Lee, Lurng-Sheng Lee, Tan-Fu Lei, Meikei Leong, Didier Levy, Kuan Liao, Tom Lii, Hong Lin, Wen Lin, Jerry Liu, Shih-hsin Lo, Shrikant Lohokare, Don McCormack, Tom McKenna, Doug Meyer, Fred Meyer, Michihiko Mifuji, Ichiro Mizushima, Stephane Monfray, Jim Moreland, Nairn Moumen, Wolfgang Mueller, Anthony Muscat, Dave Myers, Toufic Najia, Toshiro Nakanishi, Sadao Nakashima, Yasuo Nara, Masaaki Niwa, Faran Nouri, Helmut Oefner, Atsushi Ogura, Toshihide Ohgata, Carl Osburn, Jin-Goo Park, Shiesen Peng, Darryl Peters, Gerd Pfeiffer, Francesco Pipia, Noel Poduje, Jagdish Prasad, Krishnaswamy Ramkumar, K. V. Ravi, Rick Reidy, Karen Reinhardt, Jae-Sung Roh, Ed Rutter, Pete Sandow, Tom Seidel, Hwa-il Seo, Giorgio Servalli, Jim Shen, Hyun-Soo Shin, Stephen Silverman, Greg Smith, Jong-Won Sohn, Chris Sparks, Bob Standley, Jack Thomas, Carl Treadwell, Hong-Hsiang Tsai, Bing-Yue Tsui, Hidetsugu Uchida, Jason Underwood, Steven Verhaverbeke, Peter Wagner, Mike Walden, Masaharu Watanabe, Neil Weaver, Susanne Weizbauer, Jeff Wetzell, Ted White, Rick Wise, S. G. Wu

Lithography—Jin-Ho Ahn, Hiroshi Arimoto, Emanuele Baracchi, R. K. Chen, T. Y. Chen, John Cheng, HanKu Cho, Han-Ku Cho, Jae-Sung Choi, Jin-Young Choi, Ron Chu, Kevin Cummings, Giang Dao, Akihiro Endo, Ted Fedynyshyn, Gene Fuller, Reiner Garreis, Jan Willem Gemmink, Janice Golda, George Gomba, Maureen Hanratty, Isamu Hanyu, Naoya Hayashi, Scott Hector, Dan Herr, Iwao Higashikawa, B. Y. Hsu, Jerry Huang, J.R. Hwang, Koki Inoue, Rainer Kaesmaier, Masaomi Kameyama, S. H. Kau, Yoshio Kawai, Beth Kells, Hyeong-Soo Kim, Kurt Kimmel, Y. C. Ku, H. C. Kuo, Keishiro Kurihara, Benjamin Lin, Burn J. Lin, C. H. Lin, J. T. Lin, John Lin, Susumu Mori, Shigeru Moriya, Shinji Okazaki, Yoshimitsu Okuda, Se-Jin Park, Dave Patterson, S. Y. Po, Sergei Postnikov, Chris Proglor, Morde Rothschild, Masaru Sasago, Gil Shelden, Phil Seidel, C. L. Shih, Kazuyuki Suko, Takashi Taguchi, Yoichi Takehana, Hidehito Tanaka, Rebecca Tang, Tsuneo Terasawa, Walt Trybula, H. C. Tsai, Takayuki Uchiyama, Gerd Unger, Mauro Vasconi, Keiji Wada, Ulrich Wagemann, C. M. Wang, Lon A. Wang, M. H. Wang, Phil Ware, John Wiesner, Grant Willson, Masaki Yamabe, Yuichi Yamada, Atsuko Yamaguchi, Tadayuki Yamaguchi, Thomas Zell

Interconnect—Nobuo Aoi, Lucile Arnaud, Hans-Joachim Barth, Ivan Berry, Christopher Case, Kow-Ming Chang, Bau-Tong Dai, Mamoru Endo, Manfred Engelhardt, Alexis Farcy, Paul Feeney, Akira Fukunaga, Bob Geffken, Marilyn Glendenning, Narishi Gonohe, Dirk Gravesteijn, Harold Hosack, Calvin Hsueh, Calvin Hsueh, Fred Huang, Masayoshi Imai, Makiko Kageyama, Si-Bum Kim, Mauro Kobrinsky, Noh-Jung Kwak, Han-Choon Lee, Hyeon-Deok Lee, Hyeon-Dyuck Lee, Gene Li, J.D. Luttmner, Mike Mills, Hiroshi Miyazaki, Ken Monnig, N.S. Nagaraj, Tomoji Nakamura, Gary Ray, Rick Reidy, Guenther Schindler, Hideki Shibata, Winston Shue, Hyunchul Sohn, Michele Stucchi, Tony Tsai, Manabu Tsujimura, Kazuyoshi Ueno, David Wu, Osamu Yamazaki, C. H. Yu, Douglas Yu

Factory Integration—Hiroyuki Akimori, Josef Bichlmeier, Mike Bufono, Hugo S.C. Chang, Jonathan Chang, Wesley W. H. Chang, Al Chasey, Allan Chen, Thomas Chen, Gilbert Chiang, Eric Christensen, Ron Denison, Klaus Eberhardt, Patrick Fernandez, Neil Fisher, Len Foster, Ashwin Ghatalia, Barbara Goldstein, Arie Greenberg, Sven Hahn, Chung Soo Han, Parris Hawkins, Michio Honma, George Horn, J. J. Hsu, Giichi Inoue, Junji Iwasaki, Mani Janakiram, Melvin Jung, Kazuhiro Kakizaki, Franklin Kalk, Atsuhiko Kato, Shigeru Kobayashi, Shoichi Kodama,

Todd Lasater, In-Kyu Lee, Ya-Shian Li, Ricky Lin, Maggie Liu, Span Lu, Les Marshall, Dave Miller, Akira Mitsui, Eckhard Müller, Hideki Nakajima, Seiichi Nakazawa, Richard Oechsner, Mikio Otani, Chel-Soo Park, S. H. Park, Suk-Hee Park, Jeff Pettinato, Dev Pillai, Lisa Pivin, Scott Pugh, Adrian Pyke, JB Ragothaman, Claus Schneider, Mike Schwartz, Steve Seall, Marlin Shopbell, Arnie Steinman, Dan Stevens, Peggy Su, Abol Taghizadeh, Junichi Takeuchi, T.M. Tseng, K.R. Vadivazhagu, Joost van Herk, Philippe Vialletelle, Harvey Wohlwend, Hiromi Yajima, Makoto Yamamoto, William W.L. Yuan

Assembly and Packaging—Joe Adam, Steve Adamson, Mark Bird, Bill Bottoms, Kwang-Yu Byun, Chi-Shih Chang, Bill Chen, Carl Chen, Paul Chen, Wen Yan Chen, David Cheng, P. K. Chiang, Young-Bok Choi, Tsung-Yao Chu, Dan Evans, Nobuo Futawatari, George Harman, Shuya Haruguchi, Ryo Haruta, James Ho, Ted Ho, S. P. Hsu, Chender Huang, Lewis L. Hwan, Mahandevan Iyer, Hisao Kasuga, Michitaka Kimura, Eric Kung, Dong-Ho Lee, R.S. Lee, Simon Li, Mirng-Ji Lii, M.S. Lin, Hermen Liu, Shelton Lu, Hirofumi Nakajima, Kieth Newman, Kazuo Nishiyama, Bob Pfahl, Klaus Pressel, Bernd Roemer, Young-Bin Sun, Coen Tak, Kuniaki Takahashi, Takashi Takata, Ho-Ming Tong, F.J. Tsai, Ruenn-Bo Tsai, Shigeyuki Ueda, Shoji Uegaki, Henry Utsunomiya, Juergan Wolf, David Wu, Enboa Wu, Vincent Yang, Wen Kun Yang, Wilson Yang, Zhiping Yang, Eiji Yoshida

Environment, Safety, and Health—Junichi Aoyama, Hans-Peter Bipp, Roger Chang, George Chen, Steve Cho, Geun-Min Choi, Terry Francis, Nigel Hsu, Ho-Song Hwang, Francesca Illuzzi, Jim Jewett, CY Kao, Shou-Nan Li, C.N. Lin, Sam Lin, Mary Majors, Ed McCarthy, Mike Mocella, Joseph K.C. Mou, Larry Novak, Takayuki Oogoshi, Chyr-Hwan Suen, Tetsu Tomine, Ming Shih Tsai, Sy-Wen Wong, Ted Wong, Walter Worth, Tim Yeakley, Jung-Pin Yu

Yield Enhancement—Scott Anderson, Hyun-Chul Baek, Tracey Boswell, Mark Camenzind, Jan Cavelaars, Kristen Cavicchi, C. H. Chang, Chung-I Chang, Jeff Chapman, Chan-Yuan Chen, Victor Chia, Do-Hyun Cho, Uri Cho, James S. Clarke, J-M. Collard, Mark Crockett, Dirk de Vries, John Degenova, James Dougan, Diane Dougherty, Francois Finck, Tom Gutowski, Jeffrey Hanson, Rob Henderson, Benoit Hirschberger, Christoph Hocke, Ji Ho-Hong, J.J. Hsu, Jim Huang, Steven Hues, Yoji Ichiyasu, Masahiko Ikeno, Francesca Illuzzi, Rick Jarvis, Jim Jewett, Wang Jiun-Fang, Billy Jones, C. S. Jou, Keith Kerwin, John Kurowski, Sumio Kuwabara, M T Liu, Mingo Liu, Y.T. Liu, Chris Long, Michael Lurie, Steven Ma, James McAndrew, Robert McDonald, Mike McIntyre, Len Mei, Yoko Miyazaki, Fumio Mizuno, Mansour Moinpour, William Moore, Chris Muller, Yoshinori Nagatsuka, Andreas Neuber, Kazuo Nishihagi, Andreas Nutsch, Joseph O'Sullivan, Akira Okamoto, Takanori Ozawa, Shang-Kyun Park, Kevin T. Pate, Dilip Patel, Lothar Pfitzner, Dieter Rathei, Ron Remke, Mike Retersdorf, Ralph Richardson, J. Ritchison, Dave Roberts, Dan Rodier, John Rydzewski, Koichi Sakurai, Tony Schleisman, Sarah Schoen, Hisaharu Seita, C. H. Shen, Yoshimi Shiramizu, Val Stradz, Ed Terrell, Ines Thurner, Bart Tillotson, Ken Tobin, Stephen Toebes, Jimmy Tseng, Ken Tsugane, Hank Walker, Tings Wang, Jian Wei, Dan Wilcox, Hubert Winzig, Walter Worth, Albert Wu, Yuichiro Yamazaki, C. S. Yang

Metrology—John Allgair, Chas Archie, Mike Bishop, Dick Brundle, Michele Buckley, Ben Bunday, Hugo Celio, Fang-Cheng Chen, Man-Ho Cho, Alain Diebold, Shinji Fujii, Dick Hockett, Jia-Rui Hu, Chin Yi Huang, P.Y. Hung, Masahiko Ikeno, Jung-Yeul Jang, Soo-Bok Jin, David Joy, Eiichi Kawamura, Chul-Hong Kim, Steve Knight, Isao Kojima, King Lee, Pete Lipscomb, Ulrich Mantz, Jack Martinez, Joaquin Martinez, Fumio Mizuno, Kevin Monahan, Kazuo Nishihagi, Baw-Ching Perng, Noel Poduje, Michael Postek, Jimmy Price, Gary Rubloff, Jyu-Horng Shieh, Jyu-Horng Shieh, Chin Soobok, Rien Stoup, Aritoshi Sugimoto, Vladimir Ukraintsev, Brad van Eck, Mauro Vasconi, Dick T.A.P. Verkleij, Andras Vlarar, Dan Wack, Atsuko Yamaguchi, Yuichiro Yamazaki, Stefan Zollner

Modeling and Simulation—Doelf Aemmer, Susumu Asada, Vivek Bakshi, Augusto Benvenuti, Lars Bomholt, Ingo Bork, Stephen M. Cea, Y. T. Chia, Yong-Soo Cho, Jae-Hoon Choi, An De Keersgieter, Wolfgang Demmerle, Andreas Erdmann, Masato Fujinaga, Youichi Hayashi, Anco Heringa, Howard Huff, Noriyuki Ishihara, Herve Jaouen, Christian Kalus, Mitsunori Kimura, Karson Knutson, Jun Komachi, Erasmus Langer, Giles Le Carval, Keun-Ho Lee, Keun-Ho Lee, Jürgen Lorenz, Chris A. Mack, Meyya Meyyappan, Rainer Minixhofer, Wolfgang Molzer, Christoph Müller, Mitsutoshi Nakamura, Seiji Ogata, Marius Orłowski, Shane Palmer, Paul Pfäffli, Peter Pichler, Concetta Riccobene, Shigeo Satoh, F. Schellenberg, Vivek Singh, Walt Trybula, Peter L.G. Ventzek, Tetsunori Wada, Tiger Wang, J. Wiley, Reinout Woltjer, Robert Wright, Jeff Wu, Bernhard Wunderle, Peter Zeitzoff, Song Zhao

4 Introduction

REGIONAL SUPPORT TEAMS

We acknowledge and thank the regional teams for their support:

◆ *Europe—Infineon*—Carola Siebert, *SEMI Europe*—Johanna Turpeinen, Fred Kolbe, and Walter Roessger

◆ *Japan*—Yasuaki Hokari

◆ *Korea*—Jae-Min Jun

◆ *Taiwan*—Celia Shih

◆ *USA*—Yumiko Takamori, Linda Wilson

Intel meeting support team—Sally Yanez, Barbara Pebworth

International SEMATECH—Dave Anderson, Debra Elley, Sue Gnat, Mario Gonzales, Sarah Mangum,

Marilyn Redmond, Bob Ruliffson, Donna Towery

National Science Foundation—Mihail Roco

SEMI North America— Pat Gardner, Jody Sullivan

SIA—Judy Ajifu Rodgers

緒言 (FOREWORD)

国際半導体技術ロードマップ(ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors、以下 ITRS と表記)は、国際的な合意形成の成果で、本書は 15 年先を見越して半導体産業の主要な動向を予測している。半導体技術と世界での集積回路(IC)市場のこれまでの発展をさらに進展させようとして世界で努力が続けられているが、並行して、ヨーロッパ・日本・韓国・台湾・米国の 5 地域の専門家(エキスパート)が参加して本書が作成された。このことは、本書が今後の半導体研究開発の有効な指針となることを示している。現在、これらの 5 地域は共同して ITRS 活動を支援している。

1992 年、半導体工業会(SIA: Semiconductor Industry Association)が最初にロードマップ作成を取りまとめ、米国半導体技術ロードマップ(NTRS: National Technology Roadmap for Semiconductors)として発刊した。1990 年代、半導体産業はグローバルな産業となり、多くの半導体メーカーが世界各地に半導体プロセス(前工程)工場や組立工場を建設した。このような現実をふまえて、ITRS が創刊された。1998 年 4 月の世界半導体会議(WSC: World Semiconductor Council)で、SIA は、欧州、日本、韓国、台湾に対し、ITRS の共同作成を提案し、以後、ITRS の全面改訂版(Revision)は 1999 年、2001 年、2003 年に作成され、偶数年(2000 年、2002 年、2004 年)に部分改訂版(Update)が作成されている。

従来の ITRS では、「技術ノード(Technology Nodes)」という用語を IC 技術発展の主な指標として使ってきたが、2005 年版では、「技術ノード」を使用しないことにした。いままで、DRAM(Dynamic Random Access Memory)製品は、3 年ごとに新世代技術を導入し、その 1 チップあたりのビット数を 4 倍することで、技術発展のペースメーカーとなっていた。70 年代中ごろから 90 年代中ごろまでは、DRAM の金属配線のハーフピッチ(Half Pitch、ピッチの半分)が 3 年ごとに 0.7 倍になり、ビット数は 4 倍になるという関係が続いていた。世代ごとに金属配線のハーフピッチが 30%縮小される(世代ごとにハーフピッチが 0.7 倍になる)ということをもって、「技術ノード」をはっきりと確認することができた。しかしながら、ある技術ノードごとにビット数を 4 倍にするためには、チップサイズ(Die Size)は技術ノードが進むとともに増大させなければならず、結局は、半導体産業【訳者注:原文ではシリコンサイクル(Silicon Cycle)】の経済性に悪い影響を及ぼす。【訳者注:集積回路の典型的なハーフピッチが 0.7 倍になっても、素子密度は 2 倍にしかならない。メモリ 1 チップあたりビット数を 4 倍にするためには、単純に考えると、チップ面積を 2 倍になってしまう。現実には、各種の工夫により、世代あたりのチップ面積の増加率は 2 倍より小さくなっているが、チップサイズは増大する傾向が続いた。】チップサイズの増大を抑制するために、多くの半導体集積回路製造メーカーは、90 年代後半には次の技術ノードの導入ペースをそれまでの 3 年ごとから、2 年から 2 年半ごとに加速するようになった。

素子寸法(Device Feature)の縮小とともに、MPU(Micro Processor Unit)技術やフラッシュメモリ技術においても微細化が進み、DRAM 技術に近づき、場合によっては追い越すようになってきた。さらに、MPU やフラッシュメモリの微細化のペースは DRAM と同等か、それよりも速くなってきている。その結果として、半導体産業全体の発展を、DRAM の発展によって定められた(「技術ノード」のような)単一の数字で特徴づけることは、もはや、十分ではない。ITRS 2005 年版では、DRAM、MPU、フラッシュメモリのそれぞれに対して、技術発展の尺度を定義し、それを記述することとした。

また、ITRS 2005 年版では、CMOS にとってかわるであろう、新しいナノスケール素子群(Nanoscale Devices)への関心が増していることを反映して、新探究デバイス(ERD: Emerging Research Devices)の章を PIDS(Process Integration, Devices, and Structures、プロセスインテグレーション、素子、構造)の章から独立させ、そこでトピックスに言及することとした。現在、CMOS 技術は半導体産業の基幹技術であり、2020 年までも、さらにその後も基幹技術であり続けるであろうが、そうであっても、2010 年代後半には新規素子が出現し

6 Introduction

て、今までとは動作原理の異なる新方式の情報処理や情報蓄積(メモリ)に使われる時代が到来することを、まさしく、期待している。現在提案されている新規素子のほとんどは新材料の物性に非常に大きく依存している。このため、新探究デバイス(ERD)章の中に、新しく、新探究材料(ERM: Emerging Research Materials)についての半ば独立した章(sub-chapter)を設けた。

結局のところ、ITRS の目的は、半導体産業に対し技術要求とその解決策候補、およびそのタイミングを明確にし、提供することにある。主要な半導体デバイスメーカーと、装置メーカー、材料メーカー、ソフトウェアメーカー等の主要な半導体デバイス産業に対するサプライヤとなる産業、ならびに大学、コンソーシアム、政府研究機関の研究者の間で、国際的な討議、協力、合意のためのフォーラムを行うことによって、この目的は達成されている。

ITRS は半導体関連の産業全体に対する共通のリファレンスとなったし、今後もそうあり続けるものと期待している。実際、ITRS での協力により国際的なコンソーシア、大学や研究機関の研究開発での協力も進展している。今後、ITRS 2005 年版がさらに協力的な研究開発投資に繋がり、産業界全体が研究開発投資の負担をシェアできるようになることに貢献することを希望する。また、ITRS 2005 年版が、基盤技術の諸要素の活性化の一助となり続け、個々の企業のイノベーションに好影響を与えること希望している。

訳者まえがき

この文書は International Technology Roadmap for Semiconductors 2005 Edition(国際半導体技術ロードマップ 2005 年版)の全訳である。

国際半導体技術ロードマップ(以下 ITRS と表記)は、米国、日本、欧州、韓国、台湾の世界5極の専門家によって編集作成されている。日本では、半導体技術ロードマップ専門委員会(STRJ)が電子情報技術産業協会(JEITA)内に組織され、日本国内で半導体技術ロードマップについての調査活動を行うとともに、ITRS の編集・作成に貢献している。STRJ 内には 12 のワーキンググループ(WG: Working Group)、2 つのタスクフォース(設計タスクフォースと故障解析タスクフォース)、経済性検討小委員会が組織され、それぞれの専門分野の調査活動を行っている。

ITRS は改版を重ねるごとにページ数が増え、2005 年版は英文で 800 ページを超える文書となった。このような大部の文書を原文で読み通すことは専門家でも多大な労力を要するし、専門家であっても技術分野が少し異なると ITRS を理解することは必ずしも容易でない。STRJ の専門委員がその専門分野に応じて ITRS を訳出することで、ITRS をより親しみやすいものにすることができるのではないかと考えている。

訳文の作成は、STRJ 委員が分担してこれにあたり、JEITA の STRJ 担当事務局が全体の取りまとめを行った。訳語については、できる限り統一するように努めたが、なお、統一が取れていないところもある。また、訳者によって、文体が異なるところもある。ITRS の原文自体も多くの専門家による分担執筆であり、そもそも原文の文体も一定していないことも、ご理解いただきたい。誤訳、誤字脱字などが無いよう、細心の注意をしているが、短期間のうちに訳文を作成しているため、なお間違いが含まれていると思う。また、翻訳の過程で原文のニュアンスが変化してしまうこともある。訳文についてお気づきの点や、ITRS についてのご批判、ご意見などを事務局まで連絡いただければありがたい。

今回の訳出にあたっては、ITRS の本文の部分のみとし、ITRS 内の図や表の内部の英文は訳さないでそのまま掲載することとした。原文中の略語については、できるかぎり、初出の際に、「ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)」のように () 内に原義を示すようにした。英文の略号をそのまま使わないで技術用語を訳出する際、原語を引用したほうが適切と考えられる場合には、「国際半導体技術ロードマップ(ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors、以下 ITRS と表記)」「国際半導体技術ロードマップ(International Technology Roadmap for Semiconductors)」のように和訳の後に () 内に原語やそれに対応する略語を表示した。本書の巻末に用語集(Glossary)も参照されたい。原文の括弧()があってもそれを訳するために括弧を使った場合もあるが、前後の文脈の関係で判別できると思う。また訳注は「[訳者注:この部分は訳者の注釈であることを示す]」のように [] 内に表記した。また[]内の部分は、訳者が原文にない言葉をおぎなった部分であることを示している。訳文は厳密な逐語訳ではなく、日本語として読んで意味が通りやすいように意識している。ITRS のウェブ版ではハイパーリンクが埋め込まれているが、今回の日本語版ではハイパーリンクは原則として削除した。読者の皆様には不便をおかけするが、ご理解いただければ幸いである。

今回の日本語訳全体の編集は全体のページ数が膨大であるため、大変な作業となってしまいました。編集作業を担当いただいた、JEITA 内 STRJ 事務局の穂苅泰明さん、恩田豊さん、明石理香さんに変なお世話になりました。厚くお礼申し上げます。

より多くの方に ITRS をご活用いただきたいとの思いから、今回の翻訳作業を進めました。今後とも ITRS と STRJ へのご理解とご支援をよろしくお願い申し上げます。

2006 年 4 月

訳者一同を代表して

電子情報技術産業協会(JEITA) 半導体技術ロードマップ専門委員会(STRJ) 委員長
石内 秀美 (株式会社 東芝)

序論 (INTRODUCTION)

概要(Overview)

過去 40 年間にわたり、半導体産業は半導体製品の急速な進歩を達成してきた。その間に進歩した主な項目とその内容例を Table A に示す。こうした進歩は、集積回路を製造するときに使用される最小寸法 (feature size) を年々指数的に縮小する産業全般の技術力により実現されている。最もよく使用される集積化の進展を示すトレンドは、ムーアの法則 (24 カ月でチップあたりのコンポーネント数が 2 倍) である。社会にとって重要なトレンドは、集積回路の機能あたりコストの低減で、これにより集積回路がコンピュータ、電気通信、家電製品の普及に貢献し、生産性と生活の質が改善されてきた。

Table A 寸法スケールリングで可能となる IC 性能向上トレンド
(Improvement Trends for ICs Enabled by Feature Scaling)

トレンドの項目(TREND)	性能指標の例(EXAMPLE)
集積レベル (Integration Level)	コンポーネント数/チップ、ムーアの法則 (Components/chip, Moore's Law)
コスト(Cost)	機能あたりコスト(Cost per function)
速度(Speed)	マイクロプロセッサのクロック周波数 (GHz) (Microprocessor clock rate, GHz)
消費電力(Power)	ラップトップパーソナルコンピュータあるいは携帯電話の電池寿命 (Laptop or cell phone battery life)
コンパクト性(Compactness)	小型軽量製品(Small and light-weight products)
機能(Functionality)	不揮発性メモリ、撮像素子(Nonvolatile memory, imager)

「スケールリング則」とも呼ばれるこれらの進歩は、巨額の研究開発投資により可能となった。過去 20 年で必要投資額はますます増大したために、産業内での協力が進展し、多くの企業間研究開発協力、コンソーシアム、その他の協力ベンチャ企業が生まれている。国際半導体テクノロジー・ロードマップ (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS) は、特に成功を収めている世界的な協力組織化である。ITRS は半導体産業の研究開発に関し、15 年先を見通した「現時点での最良予測」を表しているとの産業界のコンセンサスを得ている。このようにして ITRS は、企業、研究機関、国家レベルの研究開発に対し格好の指標を提供している。ITRS はあらゆるレベルで行われる研究開発投資の決定に関して、決定の質を向上し、研究上のブレークスルーを真に必要としている分野へ研究の方向を向ける際の助けとなっている。

1992 年に半導体工業会 (SIA: Semiconductor Industry Association) が最初にロードマップ (Roadmap) を作成したが、その時以来、ロードマップの前提は、マイクロエレクトロニクス (Microelectronics) の微細化を続けることが機能あたりコストの低減 (歴史的には年率で約 25% から 29% の低減) と集積回路市場の成長 (歴史的には、平均すると、年率約 17% であるが、近年は産業の成熟化により成長が鈍化している) をもたらすというものであった。したがって、ロードマップは挑戦の精神に基づいて纏められたものである。とくに、「産業界がムーアの法則をはじめとするトレンドを維持するためには、どのような技術的能力を開発する必要があるか」という疑問に答えることがロードマップの基調となっている。このような技術開発はますます手ごわい挑戦

となってきた。このため、コンソーシアや[半導体製造装置や材料の]サプライヤも含め、半導体産業界が全競争的な環境下(Precompetitive Environment)でより多くの研究活動を共有するようになってきた。

ITRS 2005年版は、[国際版として作成された ITRS としては]4回目の全面改訂版であり、継続的な国際的合意形成プロセスの成果である。ヨーロッパ・日本・韓国・台湾・米国の5地域の専門家(エキスパート)が参加して本書が作成されており、これにより、ITRS 2005年版は、半導体技術と半導体集積回路市場のいままでの発展を将来にわたり拡大させようとする際に、最も信頼のおける半導体研究のガイドラインとなっている。国際協力により集積された多様な専門知識と献身的努力もあって、このロードマップは将来の半導体の技術要求に関する世界的なコンセンサスとして、今までにない新しいレベルに到達している。

なお、ITRS 2005年版や ITRS の過去の版の全文は、電子ドキュメントとしてインターネット・ウェブサイト <http://public.itrs.net> から 閲覧・印刷できるようになっている。【訳者注:JEITA の半導体技術ロードマップ専門委員会(STRJ)のウェブサイト <http://strj-jeita.elisasp.net/strj/> にも ITRS へのリンクがあり、さらに ITRS の和訳にアクセスできる。】

ロードマップの作成過程と構成 (Overall Roadmap Process and Structure)

ロードマップ作成過程 (Roadmapping Process)

ITRS の作成過程における全体調整は、国際ロードマップ委員会(International Roadmap Committee, 以後 IRC と略記)の責任で行っている。IRC は欧州、日本、韓国、台湾、米国の各地域からの2-4名のメンバ構成されている。IRC の主要機能は以下である。

- 国際技術ワーキンググループ(International Technology Working Group, ITWG)の指導と調整を行うこと
- ITRS ワークショップを主催すること
- ITRS の編集を行うこと

それぞれの技術の章は、対応する国際技術ワーキンググループ(International Technology Working Group, 以後 ITWG と略記)が執筆する。ITWG には2つのタイプ、すなわちフォーカス ITWG およびクロスカット ITWG がある。フォーカス ITWG は、設計/プロセス/テスト/パッケージという集積回路の一連の工程フローを構成する個々のステップに対応している。クロスカット ITWG は、いくつかのクリティカルなステップでオーバーラップする個別の ITWG 活動をサポートする活動である。

2005年版 ITRS では、フォーカス ITWG は以下の通りである。

- システムドライバ
- 設計
- テストとテスト装置
- プロセス・インテグレーション、デバイス、構造 (PIDS)
- 無線通信用高周波、アナログ混載技術
- 新探究デバイスと新探求材料
- フロントエンドプロセス
- リソグラフィ
- 配線
- ファクトリインテグレーション
- アセンブリと実装

クロスカット ITWG は以下の通りである。

- 環境、安全、健康

10 Introduction

- 歩留向上
- メトロロジ(計測)
- モデリングとシミュレーション

各 ITWG は、産業界(半導体デバイスメーカ、装置や材料のサプライヤ企業)、政府系研究機関、大学の専門家で構成されている。2005 年版では、全体で 1288 名の専門家がロードマップの改訂に参加した。(2003 年と比較して、参加数は 27 % 増加した。) Fig. 1 に ITWG のメンバ構成が分析されている。

各 ITWG の構成には、その技術分野の所属機関別専門化数が反映されている。たとえば、新探究デバイス(Emerging Research Devices)のように長期的な研究が必要な技術分野では、研究機関からの参加者数がサプライヤ企業からの参加者数より多い。プロセス技術(フロントエンドプロセス、リソグラフィ、配線)においては、装置・材料サプライヤからの参加者数を反映して、サプライヤからの参加比率より大きい。これは、近未来の技術的要求について述べる必要があるからである。

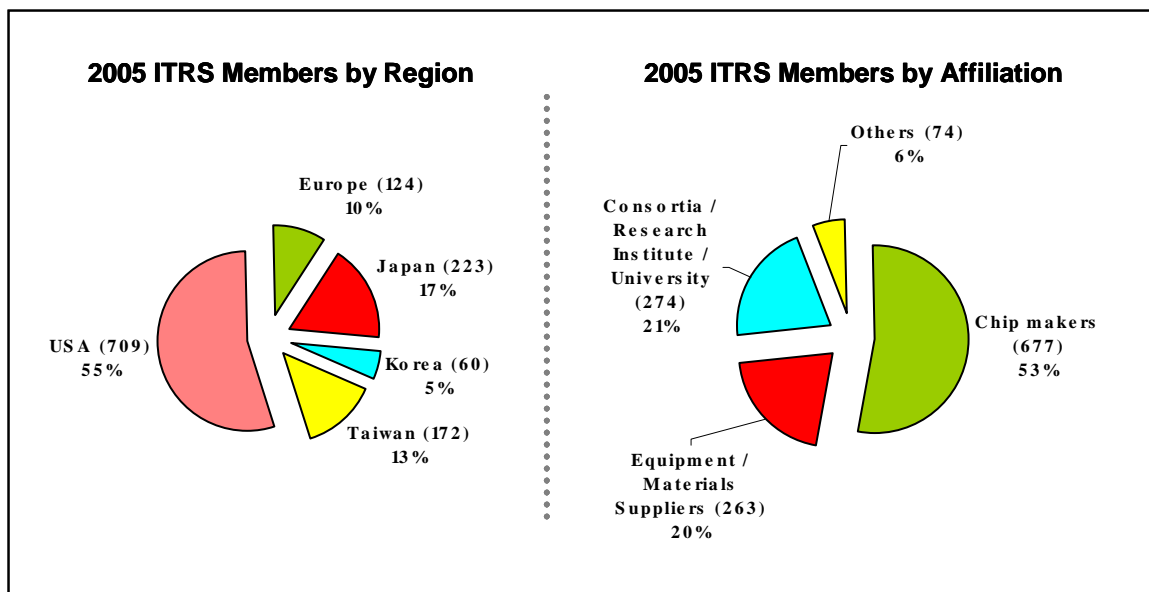


Figure 1 Composition of the ITRS Teams—1288 Global Participants

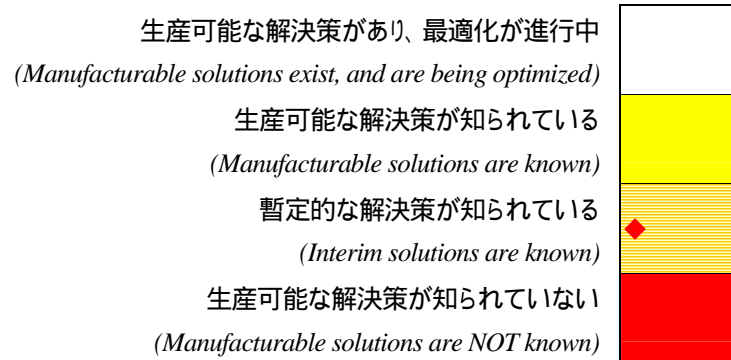
ITRS 2005 年版作成にあたって、世界レベルの ITRS 会議を 3 回開催した。ミュンヘン(ドイツ、2003 年 4 月、ESIA 主催、Infineon がホスト)、サンフランシスコ(米国、SIA 主催、SEMATECH が組織)、ソウル(韓国、KSIA が主催・ホスト)で行われた会議である。これらの会議は各 ITWG メンバ間の討議や、異なる ITWG 間調整などのフォーラムの場となった。加えて、ITRS では年 2 回、公開の「ITRS コンファレンス」を開催し、最新のロードマップの内容を開示するとともに、広い範囲の半導体業界から意見や情報を収集し、フィードバックするようにしている。

ITRS は毎年改訂されている。偶数年には表等の改訂や修正を行った Update 版を発行しており(2000 年、2002 年、2004 年)、奇数年には完全な改訂版 Revision(2001 年、2003 年、2005 年)を発行している。この ITRS のプロセスにより、絶えず半導体産業の短期的、長期的な技術要求に対しアセスメントを行っている。また、ITRS 作成の過程ではタイムリーに ITRS の予測と技術解の候補となる最新の研究開発ブレークスルーとの比較も行っている。

ロードマップの内容 (Roadmap Content)

ITRS は、[異なる研究主体間でも]研究活動が共有されるようにするため、技術的要求を明らかにし、達成されるべき目標を示している。目標はできる限り定量的なものとし、表の形で表現し、重要なパラメータの時間的進化がわかるようにした。必要に応じ、説明文を付加し、表中の数字の意味を説明し、明確化するようにした。

さらに、ITRS では、個々の目標値に対して、その成熟度や確度を表中の色で表示している。



最初の「生産可能な解があり、最適化が進行中」という状況は「白」で示されていて、「目標は現在利用できる技術や装置によって達成可能で、コスト的にも性能的にも生産可能な水準にある」ことを示している。2 番目の「黄」で示された状況は「目標達成のためには更なる開発が必要であるが、その解決策はすでに明らかになっていて、専門家は生産開始に間に合うように必要な能力を実演できると確信している」ことを示している。3 番目の「暫定的な解決策が知られている」という状況は、「現在の解決策には諸制約があっても生産開始が遅れることはないが、初期においてはなんらかの回避策が適用され、プロセス制御、歩留まり向上、生産性向上などの分野で生産性目標との乖離を埋めるためにその後の改善が期待される」ことを示している。4 番目の状況はロードマップの技術要求の表では「赤」で強調されていて、ITRS 編集が始まったところから、「赤い煉瓦の壁 (Red Brick Wall)」（以後、意識するときは「技術の壁」と訳出する）と呼ばれてきたものである。この「赤」はロードマップの上で公式に、「将来何らかの真のブレークスルーを達成しない場合にはこれまでの進歩が停止してしまう」難度の高い課題があることを明示し警告している。一部のロードマップの読者にとって「赤」が、「重要でエキサイティングなチャレンジを強調する」目的を適切に果たしていない場合があったし、また、ロードマップにおける数値を色には関係なく「確かな実現に至る道の途上にある」と見なす読者もある。しかし、これらは誤りである。

「赤」は ITRS の表中で、半導体技術のとある観点から見て、微細化を続ける上で、「生産可能(と確信できるような)な解が知られていない」ところを示すために使われる。「赤」で示された数値は次の 2 つのカテゴリに分類できる。

1. 遅れる可能性があるが、最終的にはその値は達成される。しかし半導体産業は現在提案されている解決策に対して自信が持てないでいる。
2. その値は達成されない。(たとえば、何らかの「回避策」が生まれてその数値が無用になるか、または、進歩が停止してしまう。)

第一のカテゴリの赤で表示された数値を達成するには、研究におけるブレークスルーが必要である。このブレークスルーが「赤」を「黄」(定義は「製造可能な解決策が知られている」)に変え、ITRS の将来版では最終的に「白」(定義は「生産可能な解があり、最適化が進行中」)に変えることになるだろう。

「概要(Overview)」の節で指摘したように、ITRS ロードマップは「ムーアの法則としにほかのトレンドを維持するために産業界はどのような技術的能力を必要としているか」という精神にそってまとめられたものである。そう

12 Introduction

いうわけで、「ムーアの法則を継続するためには、どの研究分野に焦点をさだめるべきか」について重点を置いて、「技術予測」を主眼しているわけではない。挑戦すべき技術課題を抽出するという精神に沿って、OTRC(総括ロードマップ技術指標, Overall Roadmap Technology Characteristics)チームは高レベルの技術的ニーズを改訂し、これが、各章の統一を図るための共通的な基準点を定めている。高レベルの目標は OTRC の各表にまとめられている。これは少なくとも部分的には、従来どおり集積回路技術の急速な発展トレンドを維持すなければならないとの経済的戦略に基づくものである。

ITRS 2005 年版で 450mm ウェハの大量生産に使われ始める時期を 2012 年としたのは、その好例である。この時期はある経済モデルに基づくものであり、現時点ではこれを予測ととらえるべきではなく、むしろ、450mm 化にともなうさまざまな技術課題に焦点をあてるための作業部会 (working groups) を導くためのひとつの方法と見るべきである。

しかしながら、過去数年にわたり、ITRS ロードマップはしばしば自己達成的な予言とみなされてきた。これは程度まで、正しい見解でもある。各企業はロードマップの目標をもとに、互いにベンチマーク(比較検討)を行うので、ロードマップは研究開発の加速のためには有効であると自ら実証することになった。この意味で、生産可能な解 (Manufacturing solutions) や採用可能な暫定解が知られている場合には、ITRS ロードマップの目標を予測として使うことが不適当というわけでもない。

とはいえ、ITRS ロードマップの目標は民事争議やその他の場で法的主張の根拠として使うべきではない。特に、ITRS ロードマップ活動へ参加企業がロードマップ目標達成を確約を意味してわけではないこと。ITRS は技術評価だけを意図して編纂されたもので、個々の製品や設備に関する商業的対価には考慮していないことに留意されたい。

技術指標 (Technology Characteristics)

すでに述べたように、述べたように、国際ロードマップ委員会 (International Roadmap Committee, 以後 IRC と略記) の指導と調整の中心的部分は OTRC (Overall Roadmap Technology Characteristics, 総括ロードマップ技術指標) の表を最初に作成し、以後継続的に改訂していくところにある。国際技術ワーキンググループ (International Technology Working Group, 以後 ITWG と略記) が編集した章には、いくつかの主要な表が含まれている。これらは、OTRC の表の作成後に、個々 ITWG の技術要求の表として作成したものである。ITRS 2005 年版では、OTRC の表も、個別の技術要求の表も、短期 (2005 年、2006 年 . . . 2013 年)、長期 (2014 年、2015 年 . . . 2020 年) に分けて、各年に対応する値が記載されている。表の様式を Table B に示す。この表には、リソグラフィに関係した OTRC の Table 1a と Table 1b からいくつかの行を引用しており、フラッシュ製品 (Flash Products, 一括消去可能な不揮発性メモリ) のコンタクトを含まないポリシリコンのハーフピッチの技術トレンドもそれに含まれている。DRAM の互い違いのコンタクトを含む M1 (最下層金属配線) のハーフピッチだけは、ITRS 2005 年版の ITWG のそれぞれの表の最初の行に標準的なヘッダーとして、必ず引用することになっている。そのほか技術トレンドの指標については、各 ITWG の判断によって OTRC の Table 1a と Table 1b から適宜選択されたものが、それぞれの ITRG の表の主要な技術ドライバを表すヘッダーとして使われている。

Table B ITRS Table Structure—Key Lithography-related Characteristics by Product

Near-term Years

YEAR OF PRODUCTION	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
DRAM stagger-contacted Metal 1 (M1) ½Pitch (nm)	80	70	65	57	50	45	40	36	32
MPU/ASIC stagger-contacted Metal 1 (M1)½ Pitch (nm)	90	78	68	59	52	45	40	36	32
Flash Uncontacted Poly Si ½ Pitch (nm)	76	64	57	51	45	40	36	32	28
MPU Printed Gate Length (nm)	54	48	42	38	34	30	27	24	21
MPU Physical Gate Length (nm)	32	28	25	23	20	18	16	14	13

Long-term Years

YEAR OF PRODUCTION	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
DRAM stagger-contacted Metal 1 (M1) ½Pitch (nm)	28	25	22	20	18	16	14
MPU/ASIC stagger-contacted Metal 1 (M1) ½ Pitch (nm)	28	25	22	20	18	16	14
Flash Uncontacted Poly Si ½ Pitch (nm)	25	23	20	18	16	14	13
MPU Printed Gate Length (nm)	19	17	15	13	12	11	9
MPU Physical Gate Length (nm)	11	10	9	8	7	6	6

OTRC と技術要求の表は、個々の技術要求の導入時期についての、現時点での最良の予想を示すことを意図したものである。技術導入年(Year of Introduction) と 生産開始年(Year of Production) についての詳細な定義については、巻末の用語集(Glossary)も参照のこと。

技術発展のペース(Technology Pacing)

以前の ITRS の版では、集積回路(IC)の寸法微細化におけ産業界の全般的進歩をあらわす単一の単純な指標として、「技術ノード(Technology Node, hpXX ノードとも表記)」を使ってきた。これは、全製品の中からコンタクトホールを含む金属配線パターンの最小のものを選んで、そのピッチの半分として定義されていた。歴史的には、DRAM(Dynamic Random Access Memory、ダイナミックメモリ)がその製品であって、特定の時点では、DRAM がコンタクトホールを含む配線パターンとしては最も微細なパターンを使い、したがって、DRAM は ITRS の技術ノードのペースメーカーとなっていた。しかしながら、現在は複数の重要なテクノロジードライバが微細化を牽引する時代となった。このため、単一のテクノロジードライバを強調し続けるのは誤解を与えてしまうと考えた。

たとえば、ハーフピッチの微細化の進展に加えて、フラッシュメモリのセル設計においてセル面積比(セル面積/ハーフピッチの自乗)の縮小が急速に進み、これが更なる高集積化をもたらした。フラッシュメモリではひとつのセルに電氣的に複数ビットを書き分ける技術が進展し、リソグラフィ上のハーフピッチの微細化とは別の手段で、ビット集積度を向上させることができた。二番目の例は MPU/ASIC 製品群である。動作速度を向上させることが技術を牽引していて、[MOS トランジスタの]孤立したゲート電極パターンの寸法微細化が進展している。このためには、最先端のリソグラフィ技術をエッチング技術がゲート電極の最終的物理微細寸法を実現するために使われている。

14 Introduction

従来の ITRS の技術ノードの定義についてはかなりの混乱があって、多くのプレスリリースやその他の文書が「ノードの加速」に言及する際には、ITRS とは異なった、または、しばしば未定義の基準に拠っていた。もちろん、異なる IC パラメータは異なる比率で微細化が進むと期待されるし、その多くのパラメータは製品ごとにその意味付けが異なるというのも確かにもっともなことである。このようなことを考慮して、ITRS 2005 年版では「技術ノード(Technology Node)」という用語を使わないことにした。そのかわり、個々の微細化された寸法を記述することにした。継続性を確保するため、DRAM の M1(最下層の金属配線)のハーフピッチを多くの表の最上段に示しているが、これは、もはや、技術ノードを記述しているわけではないことに注意されたい。これは、集積回路(IC)の微細化の複数の歴史的指標のうちの一つにすぎない。今回の変更によって、ITRS が「技術ノード(Technology Node)」という概念に関する産業界の混乱を引き起こすことがもはやなくなることを期待している。もちろん、「ノード」という用語は ITRS 以外の場では使われ続けるであろう。その際には、個々のケースで「ノード」の意味を定義し、たとえば、その製品の M1(最下層の金属配線)のピッチが示されることを期待する。

ITRS 2005 年版に共通する、全製品に対するの M1(最下層の金属配線)ハーフピッチの定義とフラッシュメモリのポリシリコン(多結晶シリコン)層のハーフピッチの定義については、Fig.2 を参照されたい。

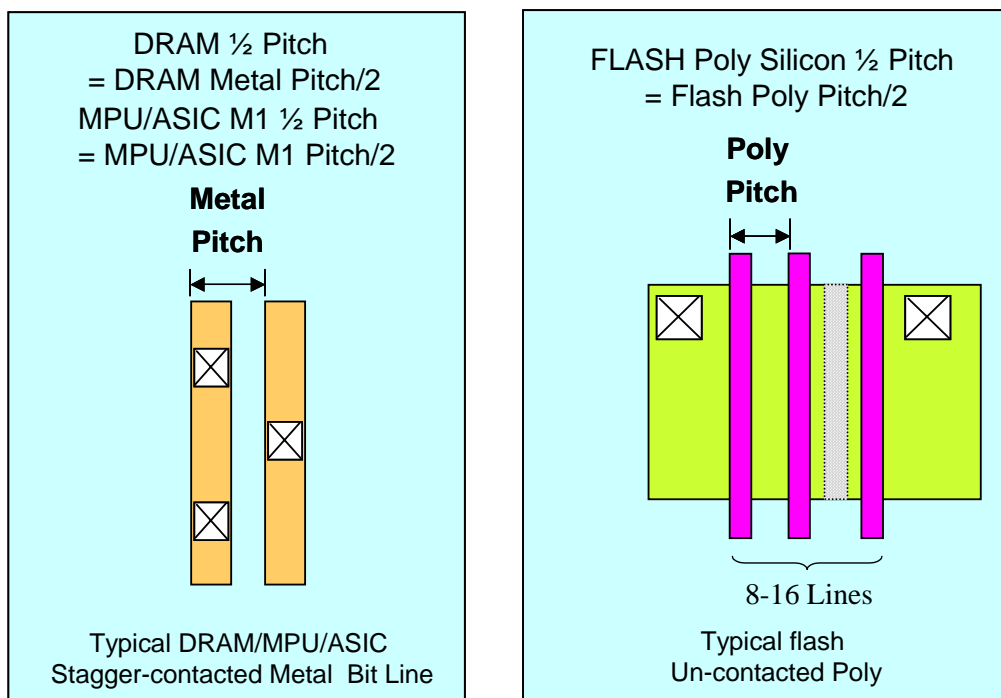


Figure 2 2005 Definition of Pitches

ITRS における技術導入時期の意味(Meaning of ITRS Time of Introduction)

ORTC(Overall Roadmap Technology Characteristics、総括ロードマップ技術指標)と技術要求の表は、技術の導入時期に対して現時点での最良の推定を示している。理想的には、それぞれの分野での要求に応じて、研究-開発-プロトタイプング-生産という一連の複数のタイミングが示されるべきである。しかし、ITRS においてはひとつのタイミングに簡単化し、「技術導入時期(Time of Introduction)」は「生産が開始された時点(Year of Production)」と定義しており、これが Fig. 3 に示されている。

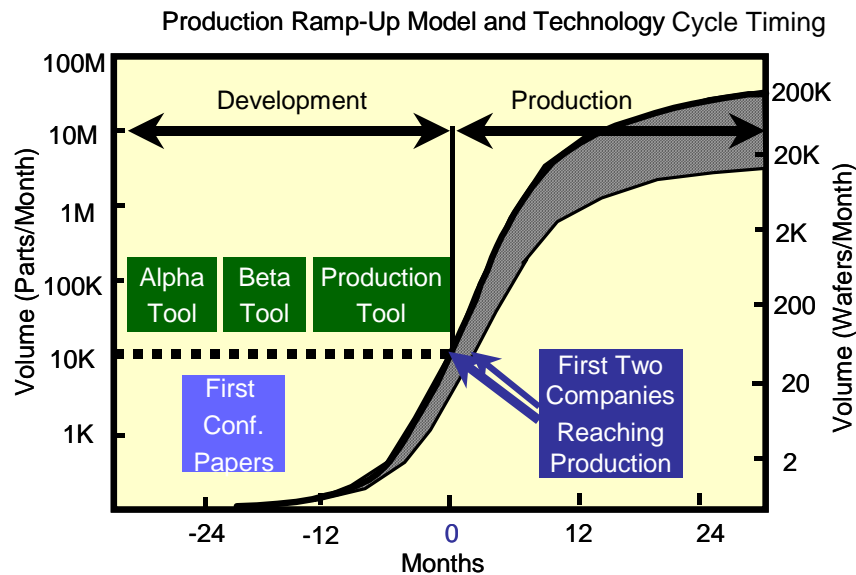


Figure 3 A Typical Production “Ramp” Curve

ITRS における“生産” タイミングとは、まず、第一の企業がある技術による生産を開始し、第二の企業が3ヶ月以内に生産を行ったタイミングである。生産とはプロセスおよび製品の認定が終了した時点である。製品の認定が終了するということは顧客が製品の納入を認めることを意味する。したがって、生産に先立ちプロセスの認定や製造装置の開発は終了していなければならない。生産用の製造装置は通常12から24ヶ月先行して開発されていなければならない。当然ながら、アルファおよびそれに続くベータレベルの製造装置は生産用製造装置の前に開発されていなければならないことになる。

Fig. 3 における「生産開始 (Time zero (0))」の時点はフル生産開始の立ち上がり時点である。例えば、2万 WSPM (wafer-start-per-month, 枚/月) の能力を持つよう設計された工場では、20 WSPM からフル能力まで生産を立ち上げるのに9から12ヶ月かかる。この時間は、6千個/月から6百万個/月の生産を立ち上げる時間に対応する。6M 枚/月の生産とは、例えば 300mm ウエハで 140mm^2 のチップ (430 チップ/ウエハ) を 2万 430 チップ/ウエハ歩留まりが 70% であったときの生産量 ($430 \text{ チップ/ウエハ} \times 2 \text{ 万 WSPM} \times 70\%$) に対応する。

SICAS 2005 の産業界の製造能力の改訂 (2005 SICAS Industry Manufacturing Technology Capacity Update)

ITRS は、文字通り、最先端半導体製造技術が最初に工場に導入される時期を予測することに注力している。ここでいう最先端半導体製造技術というのは、DRAM、フラッシュメモリ、MPU、高性能 ASIC などのように、特定の最先端半導体製品群の製造を支えるものである。一方、多くの企業においては、それぞれの理由により、最先端技術の適用時期を先行企業より遅らせることも多い。したがって、現実の製造の場においては、最先端技術から旧世代の技術にいたるさまざまな世代の技術が共存している。

Fig.4 は、棒グラフの形で、実際の世界の半導体製造能力を製品に使われる素子寸法ごとに示したものである。棒の長さ[訳者注:原文では面積となっているが、横方向の長さとするのが正しい]は、MOS 集積回路の生産能力に比例している。産業界全体の製造能力素子寸法ごとに分けて統計がとられているが、同じ年でもみても新世代から旧世代まで多くの技術にまたがった広い分布している。

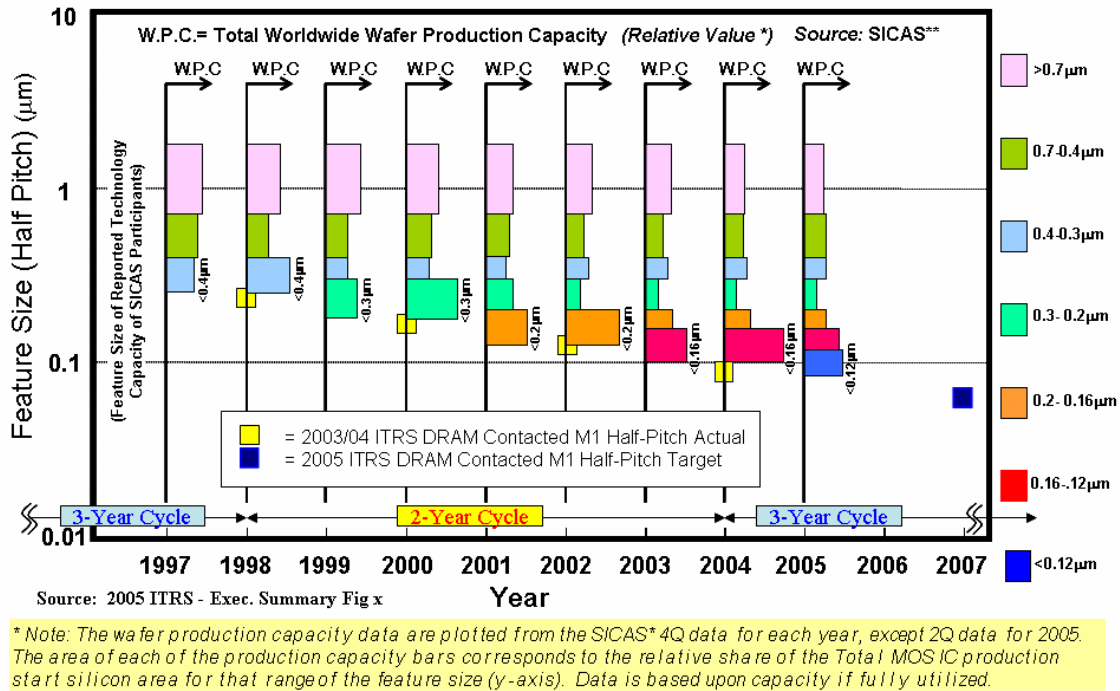


Figure 4 Technology Cycle Timing Compared to Actual Wafer Production Technology Capacity Distribution¹

ITRSの技術サイクルは、DRAMのM1(最下層の配線)のハーフピッチを尺度として表示することにし、過去に実績値を黄色の印で示した。これはITRSの各TWG(技術ワーキンググループ)が実施した産業界の技術調査結果に基づいている。この調査は2003年、2005年に実施された。これによると、最先端のDRAMのM1ハーフピッチは2年サイクルで、すなわち2年ごとに素子寸法が0.71倍というペースで推移し、1998年の0.25nmだったものが、2004年には90nmとなった。【訳者注:ITRSでは1サイクル(Cycle)を素子寸法が $1/\sqrt{2}$ となるために必要な期間と定義している。これは、素子のレイアウトが比例縮小される場合は、単位面積あたりの集積度が2倍になるために必要な期間に相当する】青い印はITRS 2005年版による目標の時期であり、2007年に65nmのDRAM技術が実現するとしている。以後2020年までは、DRAMのM1ハーフピッチの目標値は3年サイクルで0.71倍の微細化が進むとしている。2020年はITRS 2005が表として記載している最終年あたり、これを、ロードマップの地平線(Roadmap Horizon)と呼んでいる。【訳者注:Horizon(地平線、あるいは水平線)の向こう側は見通すことができないということに由来した表現。このペースで微細化が進むと、2020年ごろに、シリコンを使ったCMOSトランジスタは、微細化限界に到達すると考えられている】

最先端の素子寸法をもつ製品群の量産開始から1年以内に、生産のシェアが上昇して20-30%に到達し、またシェアが20-30%に到達した点のサイクルと量産開始のサイクルは等しいことに注目されたい。さらに、最先端技術の製造能力の比率は急上昇している。最先端技術世代とそのもうひとつ前の世代を合計すると、その製造能力も急増して、新技術導入から2ないし3年以内に全産業の生産能力の半分を占めるようになる。

しかしながら、旧世代製品の生産能力はそれほど急には減少しないが最先端製品は速やかに次世代製品にとってかわられることも注目し値する。この現象は材料・装置のサプライヤの市場とビジネスモデルにとっては重大な意味をもつ。材料・装置のサプライヤが、最終的に、ITRSの「主要な技術課題(Grand Challenges)」の解決策を開発して提供するからである。

¹ この図のデータはSIA(Semiconductor Industry Association)のSICAS(Semiconductor Industry Capacity Supply Statistics)に基づいて作成したものである。SICASのデータは全世界の半導体製造企業(全MOSの製造能力の90%以上をカバーしていると推定されている)から収集されており、SIAによって2005年7月に公表されたものをこの図で使っている。より詳細なデータはSIAのウェブサイトで一般公開されている。http://www.sia-online.org/pre_stat.cfm

サプライヤは長期間にわたって、旧世代技術の工場だけでなく、多岐にわたる技術を使う最先端の工場もサポートしなければならない。これに加えて、サプライヤはアルファ機・材料、ベータ機・材料を生産開始時期の2-3年前に供給しなければならず、さらに、その後の生産立ち上げ期に向けた必要とされる生産能力におうじられるよう準備をしなければならない。このようなシナリオは市場機会をもたらすとともに、研究開発とサポートのリソースに対する課題も提供している。

ロードマップがカバーする範囲(Roadmap Scope)

2001年版以前のITRSの各版はCMOS(Complementary Metal-Oxide-Silicon)技術のスケーリングは継続するという見方を中心として作成されていた。しかし2001年版より、われわれは次の見方をしている。ロードマップの地平線(Horizon)の向こう側(たとえば、MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)のチャンネル長が9nm以下になる時点)ではCMOSの継続スケーリングに関する楽観的予測が危うくなるということである。さらに、大部分の半導体産業関係者は、今までのようなプロセス装置および工場のコスト増加傾向を、さらにもう15年間どうやって負担し続けられるか想像することすら難しいと感じている。そこで、ITRSはポストCMOSデバイスを対象として取り上げること始めている。これらのデバイス、すなわち比較的身近なNon-planar CMOSからSpintronicsなどエキゾチックな新デバイスを含むことにより、ロードマップは必然的に拡散してゆく。CMOSの拡張であろうとまったく新規なアプローチであろうと、ポストCMOSの導入により集積回路の機能当たりのコストや性能は低減されなければならない。したがって、ロードマップでの新技術とは新デバイスだけでなく新製造技術のためのパラダイムをも含むことになる。

マイクロプロセッサ、メモリ、ロジック集積回路は、シリコンのCMOS技術を必要としている。最小寸法の微細化によって、ムーアの法則に示されるように、ひとつのチップ上にますます多くのトランジスタを集積できるようになった。SoC(System-on-Chip、複数の機能を単一チップ上に集積化する技術)の本質的機能はデータ蓄積とデジタル信号処理である。しかしながら、パワー素子[訳者注:原文はpower consumption(電力消費)であるが、前後の文脈から高耐圧または大電力を制御する素子のことと思われる]、ワイアレス通信(またはRF(高周波))、受動素子、センサー、アクチュエーター、バイオ機能はムーアの法則の通りには微細化することはできない。このような素子が必要場合は、非CMOS技術が適用されてきた。SoCとSiP(Sytem in Package、複数のチップを単一パッケージ内に実装する技術)は、必ずしも互いに競争する技術ではない。近い将来、CMOS技術と非CMOS技術が単一パッケージ内に集積化すること(すなわちSiP)がますます重要になってくるだろう。さらに、当初は専用の非CMOS技術によって満足させてきた機能も、その後の段階では、基本となるCMOS技術から派生した混載技術をつかって、CMOSのSoCとして集積化できるようになる。したがって、システムとしての機能をSoCとSiPに振り分ける方法は時とともに変化していくことになるだろう。これには、ナノエレクトロニクス(nano-electronics)、ナノ熱機械学(nano-thermomechanics)、ナノ生物学(nano-biology)などの学際領域でのイノベーションが必要とである。SiPへの応用のためには、実装技術が機能要素であり、重要差異化技術である。Fig.5に図示したので、これを参照されたい。

ITRS 2005年版の守備範囲には、すべてのCMOS集積回路に対する詳細は技術要求が含まれていて、無線通信とコンピューティング用の製品もこれに含まれる。この製品グループは世界の半導体消費の75%以上を占めている。もちろん、CMOS ICの設計、製造に使用される技術の多くは、化合物半導体、ディスプレイ、光、マイクロエレクトロメカニカル・システム(Micro-Electromechanical Systems: MEMS)等、他のデバイスに使用されている。したがって、ロードマップの目的として明示してはいないが、ロードマップはIC技術をベースとするほとんどのマイクロ、ナノ技術に関し共通する技術的要求をカバーしているのである。

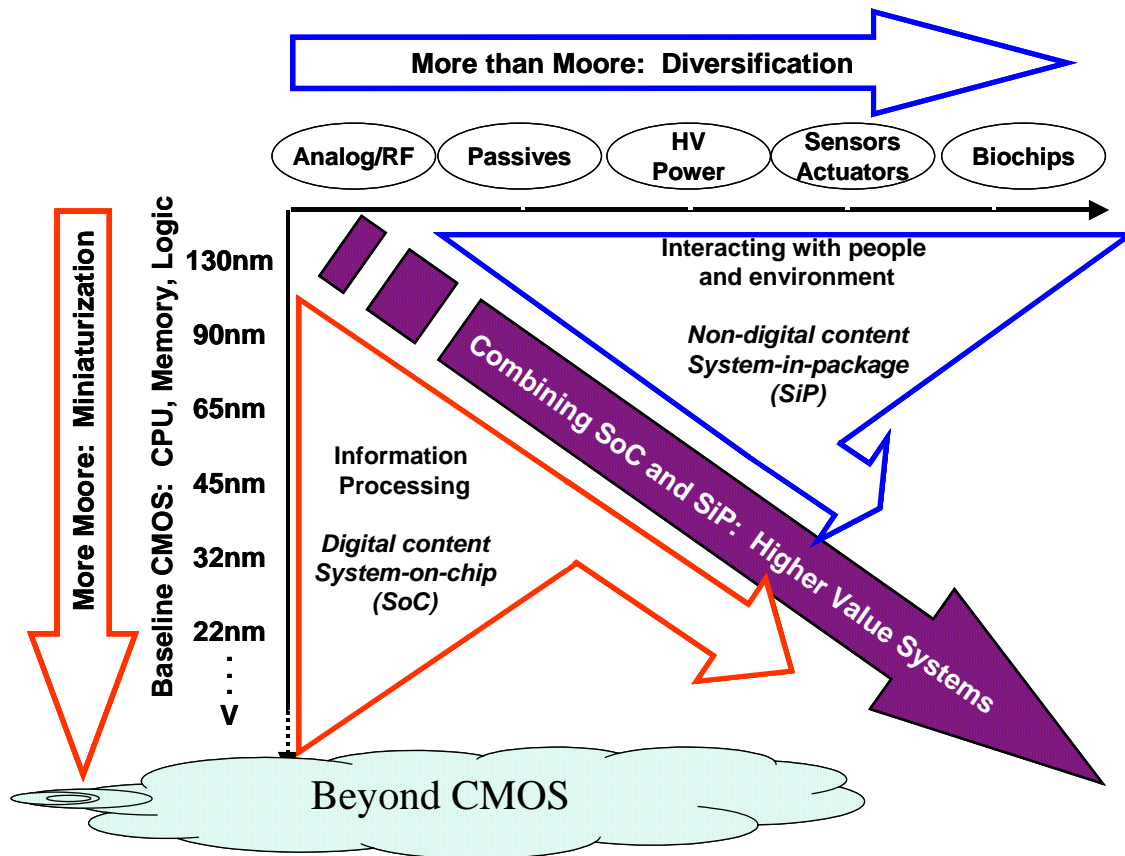


Figure 5 Moore's Law and More

解決策候補の位置づけ (Position on Potential Solutions)

ITRS は将来の技術チャレンジに対する明確な解決策を早まって特定するのを避けようと努力している。これは、ITRS が研究ニーズに対する指針となることも意図しているために矛盾するところがある。ロードマップ参加者は、ロードマップがある種の指針を提供する必要性を理解した上で、逆にそのロードマップがマイクロエレクトロニクス技術をさらに前進させる創造的なアプローチの範囲を限定してしまうと解釈されることを防ぐために、絶えず新しいやり方を追求している。その結果として生まれた妥協策として、ITRS では選ばれたチャレンジ課題に対して、なるべく説明可能な解決策候補の例だけをあげるようにしている。従ってロードマップの解決策候補は、現在までに提案された全ての解決策の完全なリストであるとか、これさえ探求すればよいという網羅的なリストと解釈してはいけない。知られている範囲でいくつかの技術的解決策候補をリストアップし、単に現在の考え方および努力の程度を読者に伝えようとしているだけである。さらに、ある特定の解決策候補をリストアップしたからといって、それがロードマップによるお墨付きを与えるものでは決していない。

したがって、本書の意図するところは、どんな技術的な障害がありそうか、そして半導体産業が何時その障害にぶつかりそうかを特定するところまでである。採用される可能性が一番高い解決策はこれだと特定するとか、現在知られている解決策に注意を集中させ、他の革新的概念を捨てさせることは本書の意図ではない。それどころかこのロードマップが逆に他の革新的な概念の創造をスタートさせる原動力となることを強く希望している。新しいアイデアの創造こそが半導体産業の将来の成功をもたらすのである！

ITRS 2005 年版のトピックス(2005 ITRS Special Topics)

無線技術(Wireless Technology)

過去数年にわたり、ITRS はその守備範囲(Scope)を拡大し続けてきた。ITRS 2003 年版には無線技術(Wireless Technology)についての記述を含め、章に準じた扱いとした。これは、モバイル製品群が急成長して半導体製品と半導体技術の重要なドライバとなったことを考慮したためである。したがって、すでに存在していたAMS(analog and mixed-signal、アナログとアナログデジタル混成)のワーキンググループがを拡張して、無線通信のための高周波(RF, Radio Frequency)技術と III-V 族の化合物半導体を PIDS(Process Integration, Devices, and Structures、プロセスインテグレーション、デバイスと構造)の章の新たな節として ITRS 2003 年版に含めることとした。最新の ITRS 2005 年版では、無線技術は独立した章となった。この分野の重要性が増したこととデバイスとシステムレベルにおける明確な性能要求(低待機時電力、低動作時電力)を考慮したためである。

新探究デバイス(Emerging Research Devices)

ITRS 2001年版では、伝統的な微細化の限界、新規材料または改良された材料で電気的性能を改善し技術の延命すること、新規デバイスアーキテクチャの導入と実現可能性について追加的な調査研究の結果を記した。新探究デバイス(ERD, Emerging Research Devices)についての新しい節は、PIDS 章と緊密連携をとりつつ 2001 年に書かれ、以後、重要な発展があった。ITRS 2005 年版では、新探究デバイス(ERD)【訳者注:原文は Emerging Research Materials となっているがこれは誤りである】が独立した章となった。

以前の ITRS の ERD 節で議論された新規デバイスや新規メモリの概念のうちのいくつかは最近より技術的に成熟してきた。このため、これらの概念は ERD 章から PIDS 章と FEP(Front End Process、フロントエンドプロセス)章で記述することとした。これには、いわゆるノンクラシカル CMOS デバイス(non-classical CMOS devices、CMOS 素子ではあるが、従来の典型的 CMOS 構造とは異なる素子、単一ゲート、マルチゲートを含む)、相変化メモリ(Phase-Change-Memory、PC-RAMともいう)、基板浮遊 DRAM(Floating-Body DRAM)が含まれる。

新探究材料(Emerging Research Materials)

新規デバイスや新規メモリの概念が ERD 章で議論されているが、その多くは新規材料を使うことになるだろう。たとえば、デバイス自体、デバイス間の相互配線、パッシベーション(passivation、デバイスを非活性化するため、薄膜を形成したり、特定の雰囲気化で熱処理したりする技術)などに新規材料が使われる。新規材料への要求は新規デバイスや新規メモリの性質や仕様に非常に強く依存している。ERD の技術ワーキンググループ(Technology Working Group, TWG)を支援するため、新探究材料(Emerging Research Materials, ERM)のサブグループが組織された。ERM サブグループの活動成果は、[ITRS2005 年版の]ERD 章で ERM の準章(sub-chapter)として公表された。