

COLLOQUE N° 1 Supplément au Journal de Physique, FASC. 10 C1-982

Colloque International du CNRS sur les Semiconducteurs Polycristallins

Perpignan (France)

**Colloque International du C.N.R.S.
sur les
Semiconducteurs Polycristallins**

Polycrystalline Semiconductors

2-4 septembre 1982
Perpignan (France)



COMITE SCIENTIFIQUE

J.J. BACMANN, Grenoble, France

W.H. BLOSS, Stuttgart, R.F.A.

J. BOURGOIN, Paris, France

J.F. GIBBONS, Stanford, U.S.A.

P. HAASEN, Göttingen, R.F.A.

C. HILL, Caswell, Grande Bretagne

P.B. HIRSCH, Oxford, Grande Bretagne

F.A. LINDHOLM, Gainesville, U.S.A.

V.T. NGUYEN, Grenoble, France

P. PINARD, Lyon, France

A. ROCHER, Toulouse, France

M. RODOT, Meudon-Bellevue, France

M. ROUZEYRE, Montpellier, France

G. SAADA, Villetaneuse, France

P. SIFFERT, Strasbourg, France

COMITE D'ORGANISATION

J.J. BACMANN, Grenoble

S. BRUNET, Perpignan

C. FONTAINE, Toulouse

P. PINARD, Lyon

A. ROCHER, Toulouse

M. ROUZEYRE, Montpellier

G. SAADA, Villetaneuse

AVANT PROPOS

Le Colloque International du CNRS sur les "Semiconducteurs Polycristallins" s'est tenu à Perpignan les 2, 3 et 4 Septembre 1982. Il a réuni une centaine de participants venus de 15 pays et intéressés par les propriétés spécifiques des joints de grains, les propriétés globales des couches polycristallines, les phénomènes de recristallisation dans les matériaux semiconducteurs ainsi que leurs applications.

Nous avons utilisé une formule qui nous a permis de réserver un temps important pour les discussions scientifiques sans qu'elles se fassent au détriment des exposés oraux. Les séances plénières du colloque ont été organisées autour de onze conférences qui ont présenté les problèmes rencontrés dans les semiconducteurs polycristallins. Les autres contributions ont toutes été exposées sous forme d'affiche. Pour permettre aux participants d'être informés de l'évolution des recherches sur l'ensemble des sujets abordés au congrès, chaque Président a fait la synthèse des communications se rapportant au sujet traité en conférence plénière. Nous avons gardé pour la mise en page des comptes-rendus, l'ordre établi dans le programme du congrès, même si au vu des articles définitifs, cet ordre aurait mérité quelques aménagements.

Nous remercions le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) d'avoir inclus cette manifestation dans son programme de "Colloques Internationaux". Il nous a permis, grâce à son soutien financier, d'organiser cette réunion dans d'excellentes conditions. Nous remercions aussi la Direction des Recherches, Etudes et Techniques de l'Armement du Ministère de la Défense (DRET) et le Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) pour leurs subventions qui ont permis d'équilibrer notre budget. Nous avons beaucoup apprécié l'accueil chaleureux réservé par la Ville de Perpignan et son Université.

Nous sommes très reconnaissants à Madame H. Tabès, du Palais des Congrès de Perpignan, et à Mademoiselle M. Lelong, responsable des Colloques au CNRS pour leur aide efficace et leurs conseils judicieux. Nous exprimons enfin notre profonde gratitude à Madame C. Fontaine, Chercheur au CNRS, qui a assuré tout le secrétariat de la conférence avec une constante bonne humeur.

André ROCHER

FOREWORD

The CNRS International Colloquium on "Polycrystalline Semiconductors" was held in Perpignan on the 2, 3 and 4 September 1982. About one hundred participants representing 15 countries met to discuss problems of grain boundaries, properties of polycrystalline layers, recrystallization of semiconductor and applications of these materials.

A considerable effort was made to preserve enough time for informal scientific discussion. Plenary sessions were centred around eleven lectures, in which various major problems of polycrystalline semiconductors were discussed. All other contributions were presented in poster sessions ; every Chairman gave a synthesis of the results contained in these contributions which were relevant to his plenary session. This initiative provided the participants with better informations and improved the unity of the meeting. For the proceedings, we have kept the order initially established for the program of the colloquium despite the fact that upon reading the complete articles some rearrangements could have been made.

We are indebted to the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) for including this meeting in its own program of "International Colloquia". Thanks to its financial support, we were able to organize this conference in very good conditions. We thank also the Direction des Recherches, Etudes et Techniques de l'Armement of the Ministry of Defense (DRET) and the Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) for their financial aid. The cordial welcome given by the City and the University of Perpignan was greatly appreciated.

Finally it is a pleasure to thank Mrs. H. Tabès, from the Congress Hall of Perpignan and Miss M. Lelong, from the CNRS Colloquium office for substantial assistance of many kinds. We are most grateful to Mrs. C. Fontaine for secretarial work which was essential in the success of this colloquium.

André ROCHER

LISTE DES PARTICIPANTS

- ANDONOV, P.- Lab. Phys. Sol., Université Paris-Sud, Bât. 510, 91405 Orsay, France.
- D'ANTERROCHES, C.- CNET, BP. 42, 38240 Meylan, France.
- AUCOUTURIER, M.- Lab. Métallurgie, Université Paris-Sud, Bât. 413, 91405 Orsay Cedex, France.
- BACMANN, J.J.- DMG, CENG, 85X, 38041 Grenoble Cedex, France.
- BARTON, R.- Max Planck Institut FKF, Heinsenbergstr. 1, 7000 Stuttgart, R.F.A.
- BARY, A.- Lab. Crist. Chimie du Solide, ISMRA, Université de Caen, 14032 Caen Cedex, France.
- BELOUET, C.- Lab. Marcoussis, CGE, Route de Nozay, 91460 Marcoussis, France.
- BENSAHEL, D.- CNS, CNET, BP. 42, 38240 Meylan, France.
- BIELLE-DASPET, D.- LAAS, CNRS, 7, Avenue Colonel Roche, 31400 Toulouse, France.
- BLERIS, G.- Physics Dept., Aristoteles University, Thessaloniki, Grèce.
- BLOSS, W.H.- Inst. Phys. Elektronik, Universität Stuttgart, Boblinger Str. 70, D-7000 Stuttgart, R.F.A.
- BOMBRE, F.- Lab. Phys. Sol., Université de Perpignan, 66025 Perpignan, France.
- BOUREE, J.E.- Lab. Phys. Sol., CNRS, 92190 Meudon-Bellevue, France.
- BOURGOIN, J.- Groupe Phys. Sol., Université Paris VII, Tour 23, 75221 Paris Cedex 05, France.
- BOURRET, A.- DRF, CENG, 85X, 38041 Grenoble Cedex, France.
- BRONIATOWSKI, A.- Lab. PMTM, Université Paris-Nord, 93430 Villetaneuse, France.
- BRUNET, S.- Université de Perpignan, Avenue de Villeneuve, 66025 Perpignan, France.
- BUYLE-BODIN, M.- ENSERG, 23, Rue des Martyrs, 38031 Grenoble, France.
- CABANE, J.- Lab. de Métallurgie, Université Aix-Marseille, Centre St-Jérôme, 13397 Marseille Cedex, France.
- CARABELAS, A.- CNR, Istituto Lamel, Via Castagnoli 1, 40100 Bologna, Italie.
- CELLER, G.K.- Bell Laboratories, 600 Mountain Avenue, NJ 07974 Murray Hill, U.S.A.
- CHANTE, J.P.- Laboratoire d'électronique, Ecole Centrale de Lyon, BP. 163, 69130 Ecully, France.
- CHENAVAS-PAULE, A.- LETI/CES, CENG, 85X, 38091 Grenoble Cedex, France.
- CHOPRA, K.L.- Dept. of Physics, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, 110016 New Delhi, Inde.
- COISSARD, P.- Dept. TIC, CNET, BP. 40, 22301 Lannion, France.

- CONSTANT, G.- Lab. Cristallochimie, ENSCT, 118, Route de Narbonne, 31077 Toulouse, France.
- COURCELLE, E.- Groupe PHASE, CRN, 23, Rue de Loess, 67037 Strasbourg, France.
- DE CRECY, A.- DRF, CENG, 85X, 38041 Grenoble Cedex, France.
- DANG, T.Q.- Groupe d'Electronique, Université de Rennes, Avenue Général Leclerc, 35042 Rennes, France.
- DAURIE, M.- Lab. Semiconducteur, ENSEEIHT, 2 Rue C. Camichel, 31071 Toulouse Cedex, France.
- DESOYER, J.C.- Lab. Métallurgie, Université Poitiers, 86000 Poitiers, France.
- DEVILLE, J.P.- Laboratoire de Cristallographie, Université Louis Pasteur, 4, Rue Blaise Pascal, 67070 Strasbourg, France.
- DHALENNE, G.- Lab. Chimie Appl., Université Paris-Sud, Bât. 414, 91405 Orsay, France.
- DIANTEILL, C.- Lab. Optique Electronique, CNRS, BP. 4347, 31055 Toulouse Cedex, France.
- DUGAS, J.- Laboratoire de Photo-électricité, Faculté des Sciences et Techniques St-Jérôme, Université Aix-Marseille III, 13397 Marseille Cedex 13, France.
- DUSSEAU, J.M.- CEES, Université du Languedoc, 34060 Montpellier, France.
- EGER, D.- Solid State Dept., SOREQ Research Lab., Yavne, Israel.
- EQUER, B.- PIRSEM, CNRS, 282, Bd. St-Germain, 75007 Paris, France.
- FAIVRE, G.- Lab. PMTM, Université Paris-Nord, 93430 Villetaneuse, France.
- FAN, J.C.C.- Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Ma 02173 Lexington, U.S.A.
- FONTAINE, C.- LAAS, CNRS, Avenue Colonel Roche, 31400 Toulouse, France.
- FORTIN, B.- 46, Rue Clairville, 35510 Cesson Sévigné, France.
- GACI, A.- Lab. Semiconducteurs, ENSEEIHT, 2, Rue C. Camichel, 31071 Toulouse Cedex, France.
- GERVAIS, A.- Laboratoire de Minéralogie Cristallographie, Université P. et M. Curie, 4, Place Jussieu, 75230 Paris Cedex 05, France.
- GUENAI, B.- Dept. ICMMPA, CNET, 22301 Lannion, France.
- GUYOT, P.- Lab. TPCM, Université de Grenoble, Domaine Universitaire BP. 44, 38041 Saint Martin d'Hères, France.
- HAOND, M.- CNS, CNET, 38240 Meylan, France.
- HARBEKE, G.- Laboratories RCA, Badenerstrasse 569, CH-8048 Zurich, Suisse.
- HEGGIE, M.- Dept. of Physics, University of Exeter, Stocker Road EX4 4QL Exeter, Grande Bretagne.
- HELMREICH, D.- Heliotronic GmbH, Postfach 1129, D-8263 Burghausen, R.F.A.
- HENDRIKS, M.- Lab. of Metallurgy, Delft University, Rotterdamseweg 137, 2628 AL Delft, Pays-Bas.
- HILL, C.- Allen Clark Research Center, Plessey Research LTD, Towcester Northants, NN 12 8 EQ Caswell, Grande Bretagne.
- KARAKOSTAS, T.- Physics Dept., Aristoteles University, Thessaloniki, Grèce.
- KAZMERSKI, L.L.- SERI, 1617 Cole Boulevard, Co 80041 Golden, U.S.A.
- KERBER, M.- Experimentalphysik Universität, Schoeptstr. 41, A-6020 Innsbruck, Autriche.

- KOMNINOU, F.- Physics Dept., Aristoteles University, Thessaloniki, Grèce.
- KORMA, E.- Dept. of Appl. Physics, Nijenborgh 18, 9747 AG Groningen, Pays-Bas.
- LABIDI, M.- Dept. de Physique, Université de Tunis, Faculté des sciences, Tunisie.
- LALANDE, F.- Lab. Photoélectricité Univ. Aix-Marseille, Centre St-Jérôme, 13397 Marseille Cedex 13, France
- LAVAL, J.Y.- Lab. Microstructures, CNRS-ESPCI, 10, Rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05, France.
- LIOTARD, J.L.- Lab. Métallurgie, Université Aix-Marseille, Centre St-Jérôme, 13397 Marseille Cedex 13, France
- LOISEL, B.- Dept. TIC, CNET, BP. 40, 22301 Lannion, France.
- LOMBOS, A.- 1455 Bvd de Maisonneuve W., H3G 1M8 PQ, Montreal, Canada.
- MAGARIÑO, J.- LCR. Thomson-CSF, BP. 10, 91401 Orsay, France.
- MANUEL, P.- Dept. Etudes et Recherches, EDF, 1, Avenue Général de Gaulle, 92141 Clamart, France.
- MARCHAND, J.J.- Lab. Physique de la Matière, INSA, 20, Avenue A. Einstein, 69621 Villeurbanne, France.
- MARTINUZZI, S.- Laboratoire de Photoélectricité, Faculté des Sciences et Techniques de St-Jérôme, Université Aix-Marseille, 13397 Marseille Cedex 13, France.
- MATARÉ, H.- ISSEC, PO. Box 49177, CA 90049 Los Angeles, U.S.A.
- MATSUSHITA, T.- College of Engineering, Osaka Industrial University, Daito Nakagaito, 574 Osaka, Japon.
- MAURICE, J.L.- Lab. Microstructures, CNRS-ESPCI, 10, Rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 05, France.
- MAURY, F.- Laboratoire de Chimie Minérale, ENSCT, 118, Route de Narbonne, 31077 Toulouse, France.
- MAUTREF, M.- Dept. Matériaux, CGE, Route de Nozay, 91460 Marcoussis, France.
- MERCIER, A.- Antenne de Rennes, ESE, Avenue de la Boulaie, BP. 20, 35510 Cesson Sévigné, France.
- MIRCEA, A.- CNET, 196, Rue de Paris, 92220 Bagneux, France.
- MÖLLER, H.J.- Institut Für Metallphysik, Universität Göttingen, Hospital Str. 12, D-3400 Göttingen, R.F.A.
- MOREL, H.- CNS, CNET, BP. 42, 38240 Meylan, France.
- MÜLLER, G.O.- ZI Elektronenphysik, Mohren Str. 40, DDR 1080 Berlin, R.D.A.
- NGUYEN, V.T.- CNS, CNET, BP. 42, 38240 Meylan, France.
- NODET, H.- Lab. Physique de la Matière, INSA, 20, Avenue A. Einstein, 69621 Villeurbanne, France.
- NOUET, G.- Lab. Crist. Chimie du Solide, ISMRA, Université de Caen, 14032 Caen Cedex, France.
- OEI, Y.S.- Lab. of Metallurgy, Delft University, Rotterdamseweg 137, 2628 AL Delft, Pays Bas.
- OKUDA, M.- College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai Mozu Osaka, 591 Osaka, Japon.
- OUALID, J.- Lab. Photoelectricité, Centre St-Jérôme, Université Aix-Marseille, 13397 Marseille Cedex 13, France.
- PAPARODITIS, C.- Lab. d'Electrooptique, Université de Nice, Parc Valrose, 06034 Nice Cedex, France.

- PARRETTA, A.- Via E. Ramarini 32,
00015 Monterotondo, Italie.
- PERIO, A.- CNS, CNET, BP.42, 38240
Meylan, France.
- PFISTERER, F.- Inst. Phys. Elek-
tronik, Universität Stuttgart,
Boblinger Str. 70, D-7000
Stuttgart 1, R.F.A.
- PINARD, P.- Lab. Physique de la
Matière, INSA, Avenue A. Ein-
stein, 69621 Villeurbanne
Cedex, France.
- POND, R.- Dept. Metallurgy Mate-
rials Science, University of
Liverpool, PO. Box 147
L69 3BX Liverpool,
Grande Bretagne.
- QUESEDA, J.- Laboratoire de Cris-
tallographie, Université Louis
Pasteur, 4, Rue Blaise Pascal,
67070 Strasbourg, France.
- RAVA, P.- Presso Oet, Heliosil,
Via Vittorio Emanuele 83,
24033 Calusco d'Adda Bergamo,
Italie.
- RICHTER, H.- Max Planck Institut,
Heisenberg Str. 1, D-7000
Stuttgart, R.F.A.
- ROCHER, A.- Lab. Opt. Electronique,
CNRS, BP. 4347, 31055 Toulouse
Cedex, France.
- RODOT, M.- CNRS, Place A. Briand,
92190 Meudon, France.
- ROUZEYRE, M.- CEES, Université du
Languedoc, Place E. Bataillon,
34060 Montpellier Cedex, France.
- SALLES, D.- Cent. Rech. ELF-Solaire,
ELF, BP. 22, 69360 St-Symphorien
d'Ozon, France.
- SARDI, L.- DAU/SPS, Ansaldo, Via
N. Lorenzi 8, 16152 Genoa,
Italie.
- SCHOCK, H.W.- Inst. Phys. Elektro-
nik, Universität Stuttgart,
Boblinger Str. 70, D-7000
Stuttgart 1, R.F.A.
- SEAGER, C.H.- Div. 5815, Sandia
Laboratories, NM 87185
Albuquerque, U.S.A.
- SHARKO, R.- Laboratoire de Minéra-
logie, Université P. et M. Curie,
T16,4, Place Jussieu, 75230
Paris Cedex 05, France.
- SICART, J.- CEES, Université du
Languedoc, Place E. Bataillon,
34060 Montpellier Cedex, France.
- SIEJKA, J.- Groupe de Physique des
Solides de l'ENS, Tour 23,
2, Place Jussieu, 75005 Paris,
France.
- STUCK, R.- Groupe PHASE, Centre de
Recherches Nucléaires, 23, Rue
Loess, 67037 Strasbourg Cedex,
France.
- SURYANARAYANAN, R.- Laboratoire de
Physique des Solides, CNRS,
92190 Meudon-Bellevue, France.
- SZKIELKO, W.- Institut Für Metall-
physik, Universität Göttingen,
Hospital Str. 12, D-3400 Göttingen,
R.F.A.
- TRUCHE, R.- Laboratoire de Mar-
coussis, CGE, Route de Nozay
91460 Marcoussis, France.
- TRUONG, V.K.- Lab. Physique de la
Matière, INSA, 20, Avenue
A. Einstein, 69621 Villeurbanne,
France.
- TURNBULL, D.- Division of Applied
Sciences, Harvard University,
Pierce Hall, Ma 02138 Cambridge,
U.S.A.
- WERNER, J.- Max Planck Institut
Für Festkörperforschung,
Heisenbergstr. 1, 7000
Stuttgart, R.F.A.
- WILSON, M.C.- Dept. of Metallurgy,
University of Oxford, Parks
Road, OX1 3PH Oxford,
Grande Bretagne.

TABLE DES MATIERES

PROPRIETES DES JOINTS DE GRAINS - PROPERTIES OF GRAIN BOUNDARIES

Président de séance : R.C. Pond

A. BOURRET et C. D'ANTERROCHES.- Structure des joints de grains dans les semiconducteurs (Conférence invitée).....	C1-1
F. KOMNINOU, Th. KARAKOSTAS, G.L. BLERIS and N.A. ECONOMOU.- Grain boundaries analysis in polycrystalline silicon by TEM.	C1-9
J.J. BACMANN, A.M. PAPON et M. PETIT.- Structure des joints de grains dans le germanium.....	C1-15
Y.S. OEI, F.W. SCHAPINK and S. RADELAAR.- TEM investigation of grain boundaries in polycrystalline silicon.....	C1-21
P. RUTERANA, A. BARY et G. NOUET.- Analyse EBIC des joints de grains dans le silicium polycristallin.....	C1-27

Président de séance : P. Guyot

H.J. MÖLLER.- Energy of grain boundaries in semiconductors (Conférence invitée).....	C1-33
M. HEGGIE and R. JONES.- Glide of partial dislocations in silicon.....	C1-45
R.C. POND.- The structure and crystallography of lateral twin boundaries in silicon.....	C1-51
R.C. POND and D.B. HOLT.- Antisymmetry of surfaces and interfaces in polar materials.....	C1-57

Présidents de séance : H. Mataré et H.J. Möller

A. BRONIATOWSKI.- Electrical measurements of the grain boundary levels in semiconductors (Conférence invitée).....	C1-63
C. DIANTEILL et A. ROCHER.- Corrélation entre contrastes en EBIC et structure cristallographique des joints de grains dans le silicium.....	C1-75
J. DUGAS, J.P. CREST et J. OUALID.- Modélisation de la hauteur de barrière des joints de grains dans une jonction - Influence de l'éclairement.....	C1-83
J. WERNER and H. STRUNK.- Electronic and structural properties of grain boundaries in Cz-grown silicon bicrystals.....	C1-89

- D. BIELLE-DASPET, M. ROUX and J. FARAH.- Minority carrier lifetime and potential barrier height in polycrystalline silicon : effects of low temperature annealings and neutron irradiation..... C1-95

Président de séance : G. Nouet

- C.H. SEAGER, D.J. SHARP, J.K.G. PANITZ and J.I. HANOKA.- Hydrogen passivation of polycrystalline silicon photovoltaic cells (Conférence invitée)..... C1-103
- M. AUCOUTURIER, O. RALLON, M. MAUTREF et C. BELOUET.- Guérison par l'hydrogène de défauts recombinaisons dans les couches de silicium polycristallin RAD..... C1-117
- L. SARDI, S. PIDATELLA and G. FIGARI.- Significance of passivation techniques on semicrystalline silicon for the improvement of solar cells efficiency..... C1-125
- R. SHARKO, A. GERVAIS and C. TEXIER-HERVO.- TEM and EBIC investigations of polycrystalline silicon sheets grown by the RAD growth process..... C1-129
- X.J. WU, V. SZKIELKO and P. HAASEN.- Charged grain-boundaries in n-Ge bicrystals..... C1-135

MATERIAUX POLYCRISTALLINS - POLYCRYSTALLINE MATERIALS

Président de séance : W.H. Bloss

- K.L. CHOPRA and V. DUTTA.- Electronic and optical properties of polycrystalline semiconducting films (Conférence invitée)..... C1-141
- F. BOULITROP et A. CHENEVAS-PAULE.- Recombinaison radiative et effets de spin dans le silicium microcristallin post-hydrogéné plasma..... C1-153
- C. PAPARODITIS, A. RIDEAU, G. MONNOM and Ph. GAUCHEREL.- Optical properties of polycrystalline thin films of GaAs obtained by MBD..... C1-159
- V.K. TRUONG, J.J. MARCHAND and H. NODET.- Grain-boundaries current-voltage characteristics on Si(p) bicrystals : multi-step resonance tunneling conduction through traps..... C1-165

Président de séance : M. Rodot

- L.L. KAZMERSKI and P.E. RUSSELL.- Chemical and electrical characterization of polycrystalline semiconductors (Conférence invitée)..... C1-171
- A. CARABELAS, D. NOBILI and S. SOLMI.- Grain boundary segregation in silicon heavily doped with phosphorus and arsenic. C1-187

J.P. DEVILLE, J. QUESADA et M.L. SOLTANI.- Incorporation, diffusion et ségrégation d'impuretés dans le silicium polycristallin.....	C1-193
B.A. LOMBOS, S. YEE, M. PIETRANTONIO and M. AVEROUS.- Grain boundaries introduced deep levels in polysilicon.....	C1-199
J.L. MAURICE et J.Y. LAVAL.- Influence de la structure et de la ségrégation aux joints de grains sur les propriétés électriques et le rendement photovoltaïque du silicium polycristallin.....	C1-207
J.L. LIOTARD, R. BIBERIAN et J. CABANE.- La diffusion intergranulaire dans le silicium.....	C1-213

RECRISTALLISATION - RECRYSTALLIZATION

Président de séance : R.C. Hill

D. BNSAHHEL et G. AUVERT.- Recristallisation de Si poly par faisceaux d'énergie (Conférence invitée).....	C1-219
G.G. BENTINI, M. BERTI, C. COHEN, A.V. DRIGO, E. IANNITTI, D. PRIBAT and J. SIEJKA.- Effect of oxygen pressure on oxygen incorporation in Si and GaAs during Q switched laser irradiation.....	C1-229
J.C. MULLER, P. SIFFERT, C.T. HO, J.I. HANOKA and F.V. WALD.- SEM characterization of EFG polycrystalline silicon solar cells realized by ion implantation and laser annealing with overlapping pulses.....	C1-235
M. OKUDA, T. MATSUSHITA, A. SUZUKI, H. NAITO and T. NAKAU.- A photo-induced memory effect observed on In-Si-Se system...	C1-241
H. RICHTER and L. LEY.- Growth of plasma-transport microcrystalline silicon as studied by in-situ Raman spectroscopy..	C1-247
M.C. WILSON, P. ASHBURN, B. SOERWIRDJO, G.R. BOOKER and P. WARD.- TEM and RBS studies of the regrowth of arsenic implanted polysilicon due to an oxidation drive-in.....	C1-253

Président de séance : V.T. Nguyen

D. TURNBULL.- Thermodynamics of equilibrium and non-equilibrium crystallization of Ge and Si (Conférence invitée)...	C1-259
J. MAGARIÑO, D. KAPLAN, R. BISARO, J.F. MORHANGE and K. ZELLA MA.- Structural and electronic properties of CVD silicon films near the crystallization temperature.....	C1-271
T. MATSUSHITA, M. OKUDA, H. NAITO, A. SUZUKI and T. NAKAU.- Photo-induced microcrystalline $\text{In}_x(\text{Si}_{0.1}\text{Se}_{0.9})_{1-x}$ film - ITO solar cell.....	C1-277

- E. COURCELLE, M. MESLI, J.C. MULLER, D. SALLES et P. SIFFERT.- Effets des traitements thermiques sur les propriétés électriques des cellules solaires à base de silicium polycristallin..... C1-283

APPLICATIONS

Président de séance : C. Belouet

- D. HELMREICH.- Multicrystalline silicon for solar cells (Conférence invitée)..... C1-289
- M. HENDRIKS, S. RADELAAR, Th.H. de KEIJSER and R. DELHEZ.- Morphology and resistivity of CVD polycrystalline silicon layers containing carbon..... C1-307
- J. OUALID, H. AMZIL, J.P. CREST, J. DUGAS, G. MATHIAN, M. ZEHAF et S. MARTINUZZI.- Propriétés électroniques des joints de grains dans le silicium polycristallin..... C1-313
- P. ANDONOV.- Crystallographic analysis of a bulky polycrystalline silicon used for photovoltaic conversion..... C1-319

Président de séance : A. Mircea

- J.J.C. FAN.- Thin films of III-V compounds and their applications (Conférence invitée)..... C1-327
- L. ALIMOUSSA, H. CARCHANO, A. FASSI-FIHRI, F. LALANDE et R. LOUSSIER.- Etude de la structure cristalline et de la composition de films d'arséniure de gallium pulvérisés, avec ou sans recuit laser..... C1-341
- F. MAURY, M. COMBES, G. CONSTANT, R. CARLES and J.B. RENUCCI.- Raman spectroscopy characterization of polycrystalline GaP thin films grown by MO-CVD process using $[\text{Et}_2\text{Ga} - \text{PEt}_2]_3$ as only source..... C1-347

Président de séance : M. Okuda

- G.K. CELLER and L.E. TRIMBLE.- Microelectronics applications of deposited Si films recrystallized from the melt (Conférence invitée)..... C1-353
- H. BAUMGART, H.J. LEAMY, G.K. CELLER and L.E. TRIMBLE.- Grain boundary diffusion in polycrystalline silicon films on SiO_2 C1-363
- A. MERCIER, M. EL KOOSY, A. LE GLAUNEC et E. LE TIRAN.- Mobilité effective dans le canal d'inversion d'un transistor MOSFET réalisé dans une couche mince de silicium polycristallin..... C1-369

R. SURYANARAYANAN and G. ZRIBI.- Microstructure and electrical properties of plasma sprayed polycrystalline silicon.....	C1-375
H. MOREL, J.P. COLINGE et J.P. CHANTE.- Modélisation de transistors MOS réalisés dans du silicium polycristallin à gros grains.....	C1-381
M. HAOND, D. BENSACHEL, D.P. VU et M. DUPUY.- Recristallisation par fusion de zone de Si sur SiO ₂ à l'aide de lampes à halogène.....	C1-387
INDEX AUTEURS	C1-391

STRUCTURE DES JOINTS DE GRAINS DANS LES SEMICONDUCTEURS

A. Bourret et C. d'Anterrosches*

Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble, Département de Recherche Fondamentale, Section de Physique du Solide, 85 X, 38041 Grenoble Cedex, France

Résumé - La structure cristallographique locale des joints de grains dans les semiconducteurs comporte certaines particularités : plusieurs types de coïncidences existent puisque le groupe d'espace des cubiques diamant contient un élément de translation. De plus les liaisons covalentes tendent à maintenir la tétracoordination même dans les défauts. Les différents motifs rencontrés dans les dislocations des sous joints peuvent fournir la base des arrangements locaux des joints. Certains motifs particulièrement simples rendent compte des joints à haute symétrie et forte coïncidence. Les résultats expérimentaux obtenus par microscopie électronique haute résolution confirment ces structures simples. Cependant il est à prévoir que pour des désorientations ou des plans de joints quelconques, des motifs complexes mettant en jeu des reconstructions soient nécessaires.

Abstract - The grain boundary (GB) local structure in semiconductors has two peculiarities : several coincidence types may exist as the space group of diamond cubic contains a translation. Moreover covalent bonding tends to favour tetrahedral arrangement even in defects. The different patterns observed in subgrain boundaries dislocations should give the basic local structures for general GB. Some of these patterns are particularly simple and can be used in highly symmetrical and coincident twin position. Experimental results obtained by high resolution electron microscopy confirm this idea. However more complex patterns containing reconstructed bonds may play an important role for more general GB.

1. **Introduction.** - La connaissance de la structure des joints de grains a beaucoup progressé depuis quelques années. En effet bien que des modèles variés aient été proposés, les méthodes expérimentales susceptibles de confronter expérience et théorie sont apparues relativement récemment. Dans ce domaine l'essentiel devait être fourni par la microscopie électronique depuis les travaux de Schober et Baluffi sur l'or (1) jusqu'aux études à haute résolution (2) plus récentes mais en plein développement. Les méthodes de diffraction X (3) ou électrons (4) fournissent également de précieux renseignements au niveau des relaxations locales et des symétries de ces relaxations (5). La nature périodique des joints de macles s'est ainsi imposée et une grande partie des descriptions de joints repose sur l'analyse des propriétés du biréseau (6) formé par les deux cristaux adjacents : le réseau de coïncidence (CSL) en particulier a souvent été invoqué pour expliquer la structure des joints observés dans les métaux. Le cas des semiconducteurs devait être abordé récemment car il comporte une complexité supplémentaire tenant à leur structure cubique diamant (ou type blende dans le cas des semiconducteurs composés). Les travaux actuels portent sur des bicristaux tirés par Czochralski (7), des cristaux maclés (8) des polycristaux (9) ou des cristaux collés (10) sur le silicium et le germanium. Aucune étude complète n'a encore été entreprise sur les semiconducteurs composés bien que de nombreuses observations de macles, joints ou sous joints aient été faites (11). Dans cette revue nous porterons une attention particulière aux structures locales qui apparaissent dans le plan du joint : nous retiendrons les spécificités

*Adresse actuelle : CNET, CNS, BP 42, 38240 Meylan, France

dues à la structure diamant (ou blende dans le cas des semiconducteurs composés) et l'accent sera mis sur le lien qui existe avec les structures apparaissant dans les dislocations ou les sous joints. Enfin nous retiendrons essentiellement parmi les méthodes expérimentales celles qui permettent d'accéder directement à l'arrangement au niveau du joint c'est-à-dire à la microscopie électronique haute résolution (M.E.H.R.).

2. Description géométrique du bicristal : les particularités du réseau cubique diamant. - Le réseau de base des semiconducteurs usuels comprend deux réseaux cubiques à face centrée équivalents (Si, Ge...) ou non équivalents (semiconducteurs composés AsGa, CdTe...) traduits l'un par rapport à l'autre de $1/4$ [111]. Par rapport au réseau de base cfc cette translation introduit de nouvelles possibilités. Pour définir la relation géométrique qui décrit le biréseau formé par les deux cristaux adjacents nous utiliserons les notations de Gratias et al (12). L'opération d'interface qui lie les deux cristaux I et II est notée $\{\Omega_0 | \vec{t}\} G_0$ où

Ω_0 = définit la rotation liant les deux cristaux plaçant l'axe de rotation sur l'origine des cristaux I et II (3 paramètres)

$\vec{t}$ = est la translation rigide du cristal II par rapport au cristal I entre les sites 000_I et 000_{II}

G_0 = est le groupe d'espace des cristaux, dans le cas présent Fd3m ou $\bar{F}43m$ pour les structures de type blende. En effet toute opération de ce groupe appliquée à I ou II laisse invariant l'interface. Enfin il faut ajouter la définition du plan de l'interface (2 paramètres) son emplacement exact dans la maille du biréseau n'étant pas indépendante du choix de $\vec{t}$ (13).

Pour certaines orientations particulières Ω_0 les points en coincidence forment un réseau périodique : ceci définit une orientation de macle d'indice Σ (l'inverse de la densité des sites en coincidence). Le réseau de coincidence ainsi formé (ou réseau csl) est invariant mais subit une translation pour tout déplacement combiné linéaire et entière des réseaux I et II. L'ensemble de ces translations forme le réseau dsc (displacement shift complete on displacement symmetry conserving). Ce réseau dsc est périodique dans le cas où le biréseau est lui aussi périodique (c'est-à-dire pour toutes les orientations de macle). Le groupe d'espace Fd3m possède lui aussi un élément de translation particulier $\tau_i = 1/4$ [111]_i ce qui

introduit une nouvelle complexité dans la description des réseaux de coincidence. Nous pouvons en particulier prévoir que à priori quatre positions de coincidence sont possibles. Les 4 types de coincidence ainsi définis C_1 , C_2 , C_3 et C_4 (fig. 1) peuvent d'ailleurs conduire à des structures identiques ou liées par des opérations de symétrie pour certaines positions particulières de Ω . Ces différents types de coincidence introduisent dans le réseau dsc des points supplémentaires que l'on a appelé des translations partielles du dsc (7)

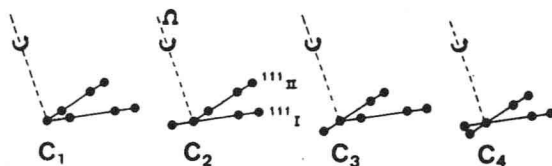


Fig. 1-Les 4 types de coincidence existant pour un joint de rotation et de plan donnés dans une structure cubique diamant. La coincidence C_1 correspond à l'axe de rotation sur les sites $|000|_I$ et $|000|_{II}$; C_2 sur les sites $|1/4 \ 1/4 \ 1/4|_I$ et $|000|_{II}$; C_3 sur les sites $|000|_I$ et $|1/4 \ 1/4 \ 1/4|_{II}$; C_4 sur les sites $|1/4 \ 1/4 \ 1/4|_I$ et $|1/4 \ 1/4 \ 1/4|_{II}$.

Four coincidence types for a given grain boundary in a cubic diamond structure. The C_1 coincidence has a rotation axis on $|000|_I$ and $|000|_{II}$; C_2 on $|1/4 \ 1/4 \ 1/4|_I$ and $|000|_{II}$; C_3 on $|000|_I$ and $|1/4 \ 1/4 \ 1/4|_{II}$; C_4 on $|1/4 \ 1/4 \ 1/4|_I$ and $|1/4 \ 1/4 \ 1/4|_{II}$

Une deuxième particularité des structures étudiées tient à la liaison de caractère covalent à coordinence 4. Le type d'hybridation sp_3 introduit une grande directionnalité des liaisons et bien qu'une certaine souplesse angulaire subsiste on peut prévoir que dans tous les cas possibles les structures de joint tendent à conserver cette coordinence. Dans les cas où cette coordinence ne peut être conservée des reconstructions des liaisons pendantes tendent à se faire, celles-ci peuvent induire des doublements de périodicité comme dans le cas des dislocations (14). L'utilisation du potentiel phénoménologique de Keating pour tous les cas de coordinence 4 permet de décrire qualitativement très correctement les structures de coeur des dislocations (15) : il serait intéressant au moins comme seconde approche de l'employer pour les joints de grains. La première approche repose simplement sur le respect d'une coordinence 4 : c'est son application systématique par Hörnstra il y a de nombreuses années (16) qui devait le conduire à proposer plusieurs schémas de joints de macles particuliers. C'est également lui qui proposait à cette époque l'idée simple qu'il suffisait de quelques configurations de base pour expliquer tous les joints. Il fallut de nombreuses années pour que les preuves expérimentales essentiellement dues à la microscopie électronique, viennent appuyer ou compléter dans certains cas, ce travail de pionnier.

3. Les interfaces périodiques : les dislocations primaires. - La description des joints de grains à faible angle fait intervenir des dislocations. Pour des joints de plus grand angle ce concept de dislocations se révèle encore utile au moins tant que les motifs formant le coeur proprement dit ne s'interpénètrent pas. Aussi allons nous commencer par résumer nos connaissances sur les sous joints.

3.1 - Les sous-joints ($<10^\circ$) - La structure des sous joints est maintenant bien comprise. Tant que l'angle de rotation reste faible ($<10^\circ$) les modèles de dislocations sont très satisfaisants. Ils permettent en outre de calculer complètement les déformations et les contraintes au voisinage du sous joint et surtout l'énergie du joint (17). De plus ces joints ont une grande importance pour la ségrégation car ils développent des contraintes à plus grande distance que les joints à grand angle. De nombreux résultats ont été obtenus dans le germanium et le silicium (4, 10, 18, 19). La plupart ont mis en évidence la grande complexité des dislocations pouvant apparaître car l'énergie de faute de ces matériaux a une valeur assez faible ~ 70 à 80 mJ/m^2 . Par exemple dans un sous joint d'axe $[011]$ les vecteurs de Burgers suivants ont été observés sur des joints de flexion ou torsion

$-b_1 = 1/2\langle 110 \rangle$ dissocié en 2 partielles $1/6\langle 121 \rangle$ (disloc. à 60° ou vis)

$-b_2 = 1/2\langle 110 \rangle$ non dissocié : (disloc. de Lomer)

$-b_3 = \langle 111 \rangle$ dissocié en 3 partielles de Frank $1/3\langle 111 \rangle$

$-b_4 = 1/2\langle 211 \rangle$ dissocié en 3 partielles dont une $1/3\langle 100 \rangle$

$-b_5 = \langle 100 \rangle$ non dissocié.

Le plan de joint détermine le ou les vecteurs de Burgers utilisés. Des configurations quelconques de joint peuvent être obtenues par combinaison de ces diverses dislocations (18) comme nous le voyons sur la figure 2.



Fig. 2-Différentes dislocations rencontrées dans un joint de flexion pure ($\theta=3^\circ$) autour de $\langle 011 \rangle$. Les vecteurs de Burgers globaux des dislocations A, B, C, D sont respectivement b_2, b_1, b_3, b_4 (Germanium).

Different dislocations on a pure tilt grain boundary ($\theta=3^\circ$) with $\langle 011 \rangle$ common axis. Burgers vector of dislocations A, B, C and D are respectively b_2, b_1, b_3, b_4 (Germanium).

Il ressort des calculs d'énergie que pour des angles $\theta > 1^\circ$, les configurations utilisant des vecteurs de Burgers b_2 ou b_3 sont aussi stables que celles utilisant les dislocations b_1 habituellement présentes dans le matériau massif. Ainsi il apparaît que le joint stabilise des configurations de dislocation nouvelles. Il est intéressant à ce stade de comparer les diverses structures de coeur caractéristiques