

08

ÉLECTRONIQUE, SEMI-CONDUCTEURS, PHOTONIQUE, GÉNIE ÉLECTRIQUE

JEAN-PIERRE GOEDGEBUER

Président de la section

GEORGES KAMARINOS

Rapporteur

Philippe Auriol

Jean-Paul Berry

Jean Bigeon

Jean-Pierre Chabrerie

Pierre Chavel

Sylvain Delage

Denis Deschacht

Jean-Paul Dom

Simone Duchemin

François Forest

Pierre Guillon

Guy Labrunie

Michel Lannoo

Augustin Martinez

Christian Pieralli

Jean-Pierre Renard

Paul-Alain Rolland

Jean-Marc Saurel

Jacques Vanbremeersch

Les travaux de la section 08 s'organisent autour de la physique des objets technologiques destinés au traitement de l'information et au génie électrique.

Les recherches sur les semi-conducteurs recouvrent la miniaturisation des composants micro-électroniques et son impact sur les circuits, les structures à base de semi-conducteurs composés et leur application à l'électronique et à l'optoélectronique.

Les fonctions optiques pour l'imagerie, le stockage et le traitement de l'information reposent sur les composants passifs, notamment micro-optiques, mais aussi sur la maîtrise de la photonique non linéaire.

Les études de diffraction et de rayonnement couvrent de mieux en mieux les problèmes de l'électromagnétisme et de l'acoustique dans toutes les gammes de fréquence et s'étendent au traitement du signal associé.

Le génie électrique optimise la conception des moteurs, actionneurs, circuits de commande et de la fourniture d'énergie.

Dans tous ces domaines, largement ouverts aux applications, l'optimisation de systèmes complexes joue un rôle croissant : composants micro-ondes en interaction avec leur environnement, comportements thermique, mécanique et électrique

des systèmes à géométrie tridimensionnelle quelconque.

La recherche de performances accrues par recours à des matériaux spécifiques est une problématique essentielle.

1 - LES COMPOSANTS ACTIFS ET LEURS TECHNOLOGIES - MICRO-ÉLECTRONIQUE, OPTOÉLECTRONIQUE, MICROSYSTÈMES

Les composants électroniques à semi-conducteurs constituent les éléments actifs des circuits intégrés, et ils sont à l'origine de toutes les avancées de l'électronique.

Les semi-conducteurs sont le matériau de base de ces composants. Le silicium est, de loin, le semi-conducteur le plus utilisé ; mais c'est surtout, avec les semi-conducteurs composés (III-V ou II-VI) que les circuits les plus performants et les plus rapides en télécommunication ou en optoélectronique sont réalisés.

Pour la réalisation des microsystèmes, une large palette de matériaux est utilisée, mais là aussi les semi-conducteurs dominent.

1. 1 L'ÉTAT DU SILICIUM - TECHNOLOGIE DE BASE, PHYSIQUE DES COMPOSANTS

Les tendances de la micro-électronique au silicium sont confirmées :

- Le silicium domine "le marché des semi-conducteurs" (99 % du marché dont 85 % en filière CMOS) (*).

- Les alliages SiGe ou SiGeC sont obtenus par techniques industrialisables, et ils ouvrent la voie pour des composants à Haute Fréquence ou en optoélectronique (transistor bipolaire à hétérojonction : f_T 160 GHz à T 300 K).

- Les microtechnologies à la base des microsystèmes se développent à grande vitesse, et – là aussi – c'est le silicium qui domine.

Les progrès de la micro-électronique, ces deux ou trois dernières années, soulèvent *une question*, confirment *une certitude* et dévoilent *une possibilité* :

- *Question* : dans "la course à la miniaturisation", ira-t-on au-dessous de 0,1 μm ?

- *Certitude* : la nécessité de "fabrication scientifique" s'impose pour des filières sub-demi-sous micro-niques.

- *Possibilité* : des avancées considérables peuvent venir par de nouvelles architectures des circuits intégrés exploitant la complexification et les effets collectifs.

La poursuite de la miniaturisation

Il est démontré, expérimentalement et théoriquement, que les limites physiques pour la réduction des tailles dans les composants de type MOS sont très basses (le TMOS à longueur de canal de 70 Å a été fabriqué et il fonctionne à très basse température).

Les limitations sont de deux types :

- *Techniques* : la lithographie optique n'est plus possible en dessous de 0,1 μm et les techniques alternatives ne sont pas (encore) industrielles.

- *Économiques* : il paraît que le coût d'installation et de fonctionnement d'une industrie produisant des circuits intégrés de TMOS de taille inférieure à 0,1 μm est prohibitif par rapport aux prévisions de développement du marché.

(*) Pour les sigles, voir le glossaire à la fin du présent chapitre.

La fabrication scientifique

L'exigence de fiabilité et le coût élevé du test pour des circuits comportant un nombre très élevé (10^8) de TMOS exigent une fabrication qui aboutisse à "zéro fluctuations" dans l'espace (pas de dispersion de paramètres "technologiques") et dans le temps (minimisation du bruit en excès par rapport au bruit thermique). *Des avancées considérables* sont à signaler dans ces domaines ; elles concernent : la mesure de la microcontamination et l'analyse de ses sources ; le contrôle fin de l'oxydation très fine ($\approx 25 \text{ \AA}$) ; les Processus Thermiques Rapides.

Les principaux *enjeux* qui émergent concernent :

- les équipements et les capteurs de contrôle des procédés techniques (*in situ* surtout),

- les problèmes électrostatiques entraînant la défaillance et la rupture des diélectriques (ESD),

- l'électromigration et la rupture des connexions métalliques,

- le contrôle fin (structural – par exemple rugosité – et électronique) des surfaces et interfaces,

- le dépôt sur silicium des diélectriques autres que le SiO_2 (nitrures, ferroélectriques...).

Des modèles tridimensionnels très élaborés ont fait leur apparition en concurrence (pour le moment) avec des modèles basés sur la dynamique moléculaire.

Avant de clore ce chapitre, nous devons citer les avancées considérables dans le domaine de la cryomicroélectronique (précision de son champ d'application) ainsi que l'obtention du SiC en qualité suffisante pour la réalisation des composants thermo-électroniques.

Il est important de signaler aussi le chemin que l'idée et la technique ont parcouru pour envisager l'électronique à "un électron". Notons, par exemple, qu'on a pu réaliser un dispositif à blocage

de Coulomb à température ambiante et que de nombreux projets pour la réalisation des transistors "à un électron" (point-mémoire) et des chaînes de transistors voient le jour.

Le "pari" des architectures avancées

Il paraît de plus en plus logique de soutenir que la course à la miniaturisation sera contournée par une avancée importante concernant l'architecture des circuits intégrés. Les architectures nouvelles s'adresseront à un traitement de l'information plus efficace. Ces recherches "appartiennent" pour le moment, aux chercheurs de l'informatique et elles concernent surtout le parallélisme.

Il n'est pas aussi exclu que l'exploitation des effets collectifs puisse aboutir à des innovations importantes, et là les physiciens ont leur mot à dire...

1. 2 COMPOSANTS AUX SEMI-CONDUCTEURS COMPOSÉS

Bien que négligeable par rapport au marché du silicium, le marché des III-V et composés assimilés est en progression rapide et continue depuis 1988 (environ 1500 millions de dollars en 1995). L'effort de recherche qui est consacré aux matériaux III-V est lié à la forte mobilité des porteurs de charge et à la très grande diversité de bandes interdites. La maîtrise des technologies de croissance permet la fabrication d'hétérostructures à modulation de dopage et de composition conduisant à la réalisation de composants capables de couvrir toutes les fonctions de l'électronique micro-onde et de l'optoélectronique.

Les progrès réalisés en croissance cristalline ont permis la croissance de couches en adaptation de maille (GaAlAs/GaAs , GaInAs/AlInAs/InP) puis en contrainte de maille (croissance pseudomorphique GaInAs/GaAs , AlAs/GaInAs/InP) et plus récemment en relaxation (croissance métamorphique InAs/AlSb/GaAs). Cette dernière avancée permet le passage du paramètre de maille du substrat à celui de la structure finale en libérant les

contraintes de désadaptation, mais également en interdisant aux dislocations générées par la relaxation de venir émerger dans la structure finale.

Les retombées de ce concept sont importantes dans le domaine des composants III-V, que ce soit pour les composants analogiques micro-ondes faible bruit ou de puissance, pour les composants logiques rapides (transistors à grille isolée par exemple) ou pour les composants optoélectroniques. En effet, cette approche permet le développement de structures mieux adaptées à leur application sur des substrats de grandes tailles et compatibles avec les filières technologiques existantes. La croissance de structure pour lasers et modulateurs 1,3 μm sur substrat GaAs à la place d'InP a été récemment publiée au Japon et aux États-Unis.

Par ailleurs, les progrès des technologies telles que la lithographie, les méthodes de gravures, les dépôts métalliques et diélectriques et des outils de conception permettent de disposer de composants III-V tant micro-ondes qu'optoélectroniques capables de couvrir la plupart des applications actuelles, en télécommunication notamment, même si de nombreux progrès sont à attendre pour les futurs systèmes.

Composants micro-ondes typiques

Plusieurs filières de transistors sont disponibles en fonderie et ont vocation à couvrir l'ensemble des fonctions de l'électronique micro-onde et millimétrique :

- Transistor Métal Semi-conducteur (MESFET) sur GaAs. Disponible en composant discret ou MMIC jusqu'à des longueurs de grille de 0,2 μm ($f_t \neq 100$ GHz). Composant de choix pour les applications grand public jusque 20 GHz (Thomson, Philips).

- Transistor à gaz bidimensionnel d'électrons (HEMT) sur GaAs (fonderie) ou InP (laboratoire). Disponible en fonderie pour des longueurs de grille $> 0,2 \mu\text{m}$, il permet de couvrir toutes les fonctions jusqu'à environ 60 GHz (Thomson, Philips). La filière 0,1 μm est en cours de transfert en fonderie

et permettra d'étendre la plage fréquentielle jusqu'à 100 GHz.

- Transistor bipolaire à hétérojonction GaInP/GaAs. Il est le composant de choix pour les applications de puissance jusqu'en gamme millimétrique. Développé au CNET et à Thomson LCR en technologie hybride ou MMIC, il est au point mais non disponible commercialement.

Composants optoélectroniques typiques

Des lasers à multipuits quantiques de type P sur InP ont été développés à Thomson LCR avec des fréquences de coupure de 22 GHz. Plus récemment des structures DFB biélectrodes ont permis au LCR d'atteindre 30 GHz. La pureté spectrale de ces lasers monomodes est de 100 KHz à quelques 10 MHz.

Des modulateurs électrooptiques à onde progressive présentent aujourd'hui des fréquences de coupure de l'ordre de 50 GHz dans les longueurs d'onde 1,3 - 1,5 μm . Le CNET a développé des modulateurs à électroabsorption sur InP avec des $f_c = 40$ GHz. Des progrès restent à faire pour couvrir la gamme millimétrique.

Des photodétecteurs sur InP développés sous forme PIN guide (f_c de 60 à 110 GHz). Photodiode avalanche à multipuits quantiques ($f_c = 10$ GHz) et MSM sont disponibles commercialement ($f_c = 40$ GHz).

1. 3 LES MICROSYSTÈMES

Les microsystèmes sont maintenant une réalité : leur émergence, fulgurante ces trois dernières années, est le produit de la rencontre d'une technologie du silicium mûre et des besoins industriels naissants.

Deux faits nouveaux sont à remarquer : un début de réalité industrielle : en effet il existe des produits microsystémiques "standard" pour des applications à grandes quantités. Et des fonderies

opérationnelles ont vu déjà le jour en Europe ou aux États-Unis, fabriquant des objets monolithiques ou en pièces détachées (assemblées en solution “multipuce” ou non).

On peut dire, brièvement, que la conjoncture des microsystèmes aujourd’hui ressemble à celle des ASIC il y a cinq ans environ : les outils scientifiques et techniques sont en cours de développement, et les nouveaux besoins que ces nouveaux outils vont permettre de satisfaire ne sont pas encore clairement définis.

2 - ONDES : ONDES ÉLECTRO- MAGNÉTIQUES, ACOUSTIQUES, OPTIQUES

Le mot “ondes” est le titre d’une orientation scientifique et technique du Département SPI couverte notamment par les recherches de la section 08. On y trouve les ondes électromagnétiques du domaine micro-ondes, les ondes acoustiques et l’optique. Les concepts sont largement communs aux trois disciplines, mais les instruments, les techniques et les sujets de recherche ne le sont pas toujours : on leur consacra donc ici des paragraphes séparés.

2. 1 MICRO-ONDES

Dans les systèmes obéissant aux lois de l’électromagnétisme, la simulation du fonctionnement des systèmes permettant d’approcher au mieux la réalité physique, prend en compte les lois physiques – notamment celles décrites par les équations de Maxwell –, les lois de comportement décrivant les propriétés des solides et des matériaux, et la mise en œuvre d’outils numériques avec pour variable le temps et/ou la fréquence.

Un des efforts les plus significatifs des dernières années a consisté à remplacer les méthodes de résolution approchées des systèmes électromagnétiques par des méthodes rigoureuses (intégrales, différentielles, variationnelles) qui permettent de prendre en compte la globalité des phénomènes.

Les systèmes considérés peuvent être classés en deux grandes catégories. On traitera ainsi successivement des **systèmes dits ouverts** et des **systèmes bornés** physiquement.

Les **systèmes ouverts** sont ceux pour lesquels se posent essentiellement les problèmes de diffraction, de rayonnement et de propagation des ondes dans l’espace libre. La diffraction décrit l’interaction entre les ondes et les obstacles, sa modélisation implique de prendre en compte des dimensions géométriques très variées par rapport à la longueur d’onde. Cette modélisation implique aujourd’hui la combinaison de méthodes numériques et asymptotiques qui prennent en compte la nature complexe des matériaux, leur non linéarité, l’hétérogénéité, l’anisotropie, la rugosité.

Les domaines d’applications sont multiples. Parmi les plus importants, citons le **radar** dans les domaines militaire et civil et la **compatibilité électromagnétique**. Cette expression désigne la prise en compte de l’environnement dans l’analyse des systèmes récepteur/émetteur, rendue indispensable par le développement spectaculaire des communications dans les domaines centimétrique et millimétrique.

Cette approche générale de l’interaction ondes-objets conduit à la résolution de problèmes directs et/ou inverses, lesquels sont liés à **l’image-rie** et au **contrôle non destructif**.

Dans les **systèmes limités physiquement**, on regroupe les circuits et systèmes qui assurent les différentes fonctions de l’électronique hyperfréquences et de l’optoélectronique, sans oublier le packaging.

Dans tous ces circuits, les sujets de recherche sont liés à la montée en fréquence et à l’augmentation de la densité d’intégration.

La simulation est une étape indispensable à la fois pour la conception et la compréhension du fonctionnement de ces circuits. Ainsi sont apparus des outils tridimensionnels qui prennent en compte la complexité des éléments et l'environnement de la puce. Ces approches permettent de s'affranchir des limites des modèles dits équivalents et de la segmentation par bloc, qui ne prend pas en compte l'interaction électromagnétique entre éléments de circuits. Aujourd'hui, les effets électromagnétiques sont traités conjointement avec les effets **thermiques** et **mécaniques** et avec **la physique des semi-conducteurs**, ce qui permet d'aborder non seulement l'analyse, mais également l'optimisation multiparamètres des caractéristiques des systèmes.

Entre systèmes ouverts et systèmes limités physiquement se trouvent **les antennes**, qui dans les systèmes modernes de communications ne peuvent être traitées sans la prise en compte des circuits auxquels elles sont couplées. Leur traitement est ainsi complémentaire de celui des circuits micro-ondes classiques.

Le thème "Électromagnétisme" est très interdisciplinaire puisqu'il fait appel à des domaines couverts par d'autres sections (mathématiques, matériaux...) et par plusieurs départements scientifiques (SPM, Chimie, SPI, SDV,...).

2. 2 ONDES ACOUSTIQUES

Ce vaste domaine de recherche peut être classé en trois catégories.

Les ultrasons dans les dispositifs électroniques

La conception et réalisation de ces dispositifs utilisent les effets purement acoustiques (filtres, résonateurs, etc.), acousto-optiques et acousto-électroniques (fibres optiques, super-réseaux). Intégrant le traitement de signal, ils utilisent surtout la génération des modes de propagation des ondes de surface (mode de Rayleigh) ou de plaque (mode de Lamb).

Les recherches portent sur la montée en fréquence. Ceci implique la réalisation de peignes interdigués par des technologies issues de celles utilisées en micro-électronique ainsi que l'élaboration de nouveaux matériaux, comme l'AlN, à fort coefficient piézo-électrique et aisés à déposer en couches minces.

Les ultrasons et les microtechnologies

Les transducteurs miniaturisés intégrés à ondes de volume ou de surface peuvent être utilisés pour des mesures locales diverses (micropression, microdéformation) ou pour la génération d'ondes acoustiques. Les structures à puits quantiques multiples permettent de moduler les propriétés des milieux.

Les techniques de microscopie acoustique à champ proche nées ces dernières années s'appuient d'une part sur les techniques développées pour les autres microscopies à champ proche et d'autre part sur les connaissances propres à la microacoustique classique. Essentiellement basée sur l'excitation piézo-électrique de pointes, la technique de champ proche nécessite la modélisation et le développement de nouveaux capteurs et surtout de nouveaux modèles de propagation des ondes élastiques utilisables en dessous de la limite de Rayleigh. Plusieurs modèles de calcul sont envisageables pour étudier le couplage sonde-objet, tous sont très complexes et nécessitent une informatique lourde. L'application à des matériaux fortement absorbants est un débouché prometteur de cet axe de recherche.

Les interactions ultrasons-matière

Avec des capteurs acoustiques pouvant fortement focaliser les ondes, on peut générer et capter des ondes de surface. Les techniques et phénomènes connus sous le vocable de signature acoustique $V(z)$, propres aux ultrasons, sont très performantes pour caractériser de façon non destructive et locale les propriétés élastiques de la matière et renseigner ainsi sur les contraintes et dommages qu'elle subit.

Si les problèmes directs laissent encore de nombreuses possibilités d'investigations, la résolu-

tion des problèmes inverses ouvre un champ encore plus vaste et nécessite des outils mathématiques et des approches très diverses et complexes. Les techniques de l'optique de Fourier et du traitement du signal peuvent y être précieuses.

Tous ces domaines de recherche permettent d'accroître la connaissance sur les matériaux. Ils ouvrent cependant également la voie à des applications acousto-électroniques et acousto-optiques. Ainsi, le contrôle de la cavitation est un enjeu de recherche fondamentale aux applications pratiques multiples.

Les ultrasons sont en interaction très forte avec les microtechnologies, tant pour la fabrication de transducteurs miniaturisés au profit de ces dernières que pour leur utilisation dans les micro-actionneurs à ultrasons. Les techniques de fabrication collective sont à développer. Les **moyens de caractérisation** des matériaux, des composants et des échantillons biologiques reposent de plus en plus sur les microscopies à champ proche, tant pour la résolution atomique que pour l'échelle de la dizaine de nanomètres.

Cependant, la nécessité d'une interprétation sûre des données recueillies engendre un important travail de simulation numérique et d'expérimentation.

2. 3 OPTIQUE

Issue, voici plusieurs décennies, de la fonction la plus traditionnelle de l'optique, la formation d'images, la notion de "fonctions optiques" s'est enrichie par des apports technologiques et conceptuels au point qu'il convient de préciser son étendue, qui recouvre très largement les préoccupations des opticiens de la section 08. Les fonctions optiques concernent des signaux à une dimension ou à deux dimensions, parfois davantage, elles sont spatiales ou temporelles, parfois l'un et l'autre. Elles incluent :

- l'émission, la modulation, l'amplification et la détection de faisceaux lumineux,

- la mise en forme (temporelle) d'impulsions,
- la mise en forme (spatiale) de fronts d'onde,
- l'imagerie, en particulier sous ses développements déclenchés par des apports technologiques récents,
- le traitement, le stockage et la visualisation d'informations,
- la mesure par voie optique.

Très diversifiées, les fonctions optiques s'appuient ainsi de plus en plus sur la notion de signal optique – on parle désormais de "l'optique de l'information" comme d'une sous-discipline. Dans les six paragraphes de cette présentation de la conjoncture, la maîtrise des matériaux est une préoccupation pratiquement omniprésente, qu'il s'agisse de semi-conducteurs utilisés par ailleurs pour des fonctions électroniques ou de matériaux élaborés spécifiquement pour des fonctions optiques.

Optique non linéaire, optique quantique, optique atomique

L'optique non linéaire prend maintenant une importance pratique dans le développement des réseaux de télécommunications. Les effets paramétriques sont actuellement utilisables pour l'amplification d'images. L'optique quantique permet l'amplification à bruit réduit, les mesures quantiques non destructives, le cryptage de l'information. Appliquée depuis longtemps aux particules chargées, l'optique atteint aujourd'hui aussi les atomes neutres où la manipulation des fonctions d'ondes fait apparaître une nouvelle optique physique.

Parmi les matériaux étudiés pour l'optique non linéaire figurent les hétérostructures en semi-conducteurs composés, les empilements à accord de phase synthétique pour le doublage de longueur d'onde. Mentionnons aussi les sols-gels et les cristaux diélectriques et polymères non linéaires ou photoréfractifs.

Optoélectronique et optique guidée

Les circuits intégrés associant l'optique guidée à l'électronique ont commencé à sortir des laboratoires pour augmenter les performances de systèmes industriels.

Les fonctions de l'optique guidée se développent à la fois en optique planaire et dans les fibres : en peu d'années, les amplificateurs à fibres dopées ont bouleversé l'évolution des télécommunications. Le dopage aux ions de terres rares adaptées à divers domaines de longueurs d'onde font progresser lasers et amplificateurs guidés.

Le stockage optique d'information progresse grâce à l'enregistrement en volume.

Sources lasers

Le besoin d'étendre la gamme de fréquences atteinte par des lasers puissants et compacts justifie de nombreux autres travaux sur l'élaboration de matériaux pour les "microlasers", qui promettent des progrès en compacité et en pureté spectrale et spatiale par rapport aux lasers des décennies précédentes.

Parallèlement, la maîtrise des diodes laser a permis de les utiliser dans des étalons de fréquence sans renoncer à l'augmentation de leur puissance émise. Les microcavités optoélectroniques, qui confinent simultanément les porteurs et la lumière, ont déjà trouvé une application commerciale pour l'interconnexion optique entre processeurs.

Procédés nouveaux d'imagerie

La qualité de l'imagerie classique a atteint des records avec les plus récents objectifs de microliothographie. Mais l'imagerie et la microscopie s'étendent à des situations nouvelles : apparition d'achromats hybrides, c'est-à-dire combinant réfraction et diffraction. Dans le domaine des rayons X mous, la qualité de surface et l'uniformité des couches minces permettent désormais de réaliser des miroirs. L'imagerie et l'holographie résolues dans le temps à l'aide d'impulsions femtosecondes permet-

tent d'aborder l'imagerie de milieux fortement diffusants : ce principe pourrait connaître des applications biologiques et médicales.

La microscopie optique à champ proche, qui consiste à obtenir une information à partir du couplage entre une pointe fine et le champ d'onde évanescentes à proximité de l'objet étudié, a atteint récemment une résolution record de $\lambda/500$. Sa parenté avec le microscope acoustique à champ proche a déjà été soulignée.

Capteurs

Les capteurs biologiques se développent au point que l'on a proposé de parler de "biophotonique". L'interférométrie connaît des perspectives nouvelles : citons le domaine X et les interféromètres géants destinés à la détection des ondes de gravitation.

Couches minces et micro-optique

La maîtrise de la réflexion et de la transmission des composants optiques par les techniques de dépôts de couches minces a atteint un niveau remarquable, avec par exemple des pertes résiduelles limitées dans certains cas à un millionième. Le problème de la synthèse optimisée en continu pendant la croissance reste largement ouvert.

La modélisation de la diffraction dans des situations de plus en plus variées et la possibilité de graver des structures de dimensions submicro-niques sur des profondeurs de l'ordre de la longueur d'onde ouvre une nouvelle micro-optique. Des gravures profondes complexes permettent de s'approcher des matériaux synthétiques à gap photonique et de la localisation forte de la lumière, dont une application est le laser sans seuil.

Les frontières de l'optique

Tout découpage a ses limites. Le rapprochement dans le présent rapport de l'optique et des micro-ondes nous permet de mentionner ici l'émergence d'une synergie prometteuse : modu-

lation de faisceaux lumineux à très haute fréquence, détecteurs optiques à ondes progressives, génération de signaux micro-ondes et test de circuits micro-ondes par impulsions lasers. La séparation entre l'optique et l'électronique, en revanche, ne devrait pas masquer les interactions et sujets d'intérêt communs entre ces deux disciplines : on a vu ci-dessus qu'ils concernent les matériaux, composants et systèmes optoélectroniques, l'ensemble des télécommunications optiques, le traitement optoélectronique du signal, la métrologie des temps et des fréquences.

La diversité de l'optique, illustrée ci-dessus à la lumière des fonctions optiques, s'étend encore au-delà et dépasse largement les limites de la section 08. Nous avons mentionné ci-dessus les thèmes propres de la section 08 et aussi certains sujets qui en sont proches, mais qui sont traités plus extensivement par d'autres sections ; dans quatre départements scientifiques du CNRS au moins (SPI, SPM, SDU et Chimie), on trouve des chercheurs dont l'activité principale se rattache à l'optique.

3 - GÉNIE ÉLECTRIQUE

Les activités de recherches dans le domaine du génie électrique peuvent être regroupées dans quatre thématiques intercorrélées. Celles-ci sont relatives aux études des matériaux, des composants, des systèmes et, enfin, de modélisation et de conception. Signalons aussi qu'il s'avère de plus en plus important d'imbriquer ces thèmes aux problèmes d'environnement et de société.

Les domaines de recherche examinés par la section 08 ne sont que très partiellement concernés par l'élaboration des matériaux ; par contre, la caractérisation, la modélisation, l'adaptation et la mise en œuvre constituent des thèmes majeurs. Les matériaux concernés sont principalement les isolants liquides ou solides, les matériaux magnétiques, les semi-conducteurs, les supraconducteurs (BT_c et HT_c), les matériaux composites et enfin les matériaux dit "d'interfaces".

Concernant les *isolants* et les *matériaux magnétiques*, de grands progrès ont pu être réalisés ces dernières années. En effet, des études expérimentales de plus en plus performantes ont permis de mieux cerner un grand nombre de phénomènes physiques. Toutes ces études autorisent maintenant un travail de modélisation de plus en plus fin de ces phénomènes afin de pouvoir mieux adapter ces matériaux aux exigences nouvelles des concepteurs de composants et de systèmes. En effet, des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années dans les méthodes de conception visant des critères simples de performances intrinsèques des systèmes (rendement ou puissance massique optimaux, par exemple), et la demande industrielle tend maintenant vers un ensemble complexe de critères prenant en compte des considérations de maintenance prédictive, de sûreté ou de fiabilité de fonctionnement, de compatibilité électromagnétique ou encore de possibilité de recyclage.

Les études sur les *semi-conducteurs* ont principalement porté sur les composants de puissance assurant des fonctions de commutation dans les convertisseurs électroniques, avec notamment d'excellents résultats pour les transistors bipolaires à grille isolée ; les études entreprises dans le domaine de l'intégration en électronique de puissance pour gagner encore en performance, en tension et en fréquence de commutation confirment les besoins dans ce domaine stratégique. Par ailleurs, des résultats prometteurs ont été obtenus sur les composants électroniques à haute température de jonction (SiC).

Dans le domaine des *matériaux supraconducteurs*, même si les applications ne se sont pas hissées à la hauteur espérée, on assiste toujours à une activité de recherche soutenue.

Bien que leur utilisation ait progressé ces dernières années, les *matériaux composites* présentent encore un très fort potentiel d'application, et leur élaboration commence à donner lieu à des collaborations interdisciplinaires.

Enfin, les *matériaux "d'interfaces"* concernent surtout les applications à la connectique, aux contacts électriques et aux interactions arc-électrodes, avec une demande industrielle soutenue.

Dans le domaine des actionneurs et convertisseurs au sens large, les progrès ont porté simultanément sur la modélisation, les structures et la commande. En modélisation, on a assisté à la généralisation des outils de calcul de champs tridimensionnels, associée à la prise en compte des interactions externes, qui débouche sur les phénomènes couplés. Après l'analyse développée dans le passé, des outils de conception deviennent opérationnels progressivement : ils utilisent de nombreuses méthodes, techniques, algorithmes, élaborés dans des disciplines voisines, en les adaptant au domaine du génie électrique.

Une grande variété de structures, mieux adaptées à chaque application, a été rendue possible par la généralisation des aimants à hautes performances. Par ailleurs, les microtechnologies ont commencé à aboutir à des microactionneurs opérationnels.

Les convertisseurs d'électronique de puissance ont formidablement bénéficié de l'avènement de l'IGBT, qui a permis simultanément les hautes fréquences et la grande puissance. C'est ainsi que l'on commence à prendre en compte, à la conception du convertisseur, un nombre de fonctions de plus en plus complexes telles que la pollution électromagnétique, la gestion de l'énergie ou la sûreté de fonctionnement. Pour résoudre ces problèmes créés par des interactions fortes, il faut d'une part améliorer les modèles, ensuite concevoir et implanter des commandes plus performantes, enfin intégrer commande et puissance : ces travaux sont aujourd'hui en plein développement.

Dans le domaine des systèmes, on s'est intéressé d'une part aux problèmes internes, d'autre part, à leur environnement. C'est ainsi que les réseaux d'énergie électrique ont vu se généraliser les techniques numériques en contrôle et commande, et les premières mises en œuvre de systèmes experts ; et le besoin croissant de qualité de l'énergie a impulsé les recherches sur les filtres actifs, les parafoudres ZnO, les matériaux synthétiques et les limiteurs de courant. Quant aux interactions avec l'environnement – dont l'étude est rendue nécessaire par la susceptibilité grandissante des récepteurs électriques, tant grand public qu'industriels, ou bien par la montée en fréquence des systèmes de puissance –, elles ont suscité un volume important de recherches (CEM, foudre, effets biologiques...), théoriques et expérimentales, et sont pleinement d'actualité.

De ce bilan succinct, on dégagera des tendances ou caractéristiques communes aux thèmes de recherche actuels en génie électrique, où l'analyse fait place de plus en plus à la maîtrise des phénomènes et aux outils de conception des systèmes. Au-delà des limites traditionnelles, une pluri- ou multi-disciplinarité est de rigueur, allant des systèmes experts aux matériaux, sur un très large spectre de fréquences.

La fiabilité des équipements est devenue une priorité majeure, et les travaux dans ce domaine sont en plein essor. Enfin, la généralisation des applications grand public a induit la prise en considération des perturbations électromagnétiques, a entraîné la minimisation des coûts, et motive fortement les technologies pour leur intégration fonctionnelle.

Glossaire des sigles employés

ASIC : Application Specific Integrated Circuit (circuit sur demande)
 BT_c : Basse température critique
 CEM : Compatibilité Electro-Magnétique
 CMOS : Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (filiales à transistors MOS complémentaires)
 DFB : Distributed Feed Back (contre réaction distribuée)
 f_c : Fréquence de coupure
 f_T ou f_t : Fréquence de transition
 HEMT : High Electron Mobility Transistor (transistor à mobilité électronique élevée)

HT_c : Haute Température critique
 IGBT : Isolated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée)
 MESFET : Metal Semiconductor Field Effect Transistor (transistor à effet de champ métal semiconducteur)
 MMIC : Monolithic Microwave Integrated Circuit (circuit intégré à microondes monolithique)
 MOS : Métal-Oxyde-Semiconducteur
 MSM : Métal-Semiconducteur-Métal
 PIN : (diode) P type-Intrinsèque-N type
 TMOS : Transistor Métal-Oxyde-Semiconducteur