



École d'Eté sur “ l'effet tunnel dans les solides ”

Société Française de Physique

► To cite this version:

Société Française de Physique. École d'Eté sur “ l'effet tunnel dans les solides ”. Revue de Physique Appliquée, 1970, 5 (6), pp.895-900. 10.1051/rphysap:0197000506089500 . jpa-00243470

HAL Id: jpa-00243470

<https://hal.science/jpa-00243470>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE D'ÉTÉ SUR « L'EFFET TUNNEL DANS LES SOLIDES »

organisé par

La Société Française de physique

Anglet, France

(17-27 juin 1970)

Une particule quantique peut franchir une barrière de potentiel, si cette barrière n'est pas trop élevée et si la particule n'est pas trop lourde. Cet effet tunnel, introduit en 1927 par Oppenheimer a été utilisé pour l'étude de la radioactivité α , du phénomène d'avalanche dans les diélectriques. Frenkel en 1930 l'a appliqué à l'étude de l'émission de champ des électrons à partir de la surface des métaux et à celle de la conduction entre deux conducteurs séparés par une mince couche isolante d'épaisseur variant entre 5 et 100 Å.

Sous cet aspect, « l'effet tunnel dans les solides » a connu un important développement stimulé, en particulier, par la découverte et la compréhension de la conduction tunnel par L. Esaki en 1957 [1] dans les diodes faites de deux semiconducteurs p. n. fortement dégénérés. De même en 1960 I. Giaever [2] a relié directement la forme de la caractéristique courant-tension de diodes métal-oxyde-supraconducteur à l'existence de la bande interdite du supraconducteur. Une école d'été à Risö [3] en 1967 faisait le point des développements de l'effet tunnel dans les structures à couches d'oxyde, les diodes p. n., les barrières de Schottky (formées sur un semiconducteur fortement dopé), et de son utilisation à l'étude des supraconducteurs, des semiconducteurs et semimétaux. En septembre 1969 une rencontre dans le Maine sur les effets non liés à la supraconductivité indiquait les limitations de cette technique à l'étude des propriétés des métaux à cause de la faible portée des effets électroniques de surface. De plus il était souligné la forte sensibilité de l'effet tunnel aux propriétés des interfaces d'où la nécessité d'études en liaison avec la physique des surfaces. C'est dans cet esprit que s'est déroulée à Anglet en juin 1970 une école internationale d'été sur l'effet tunnel dans les solides sous le patronage de la Société Française de Physique.

Nous rappellerons successivement le thème des cours de cette école en signalant dans une première partie les différents exposés où sont apparus les problèmes posés par l'effet tunnel. Nous discutons ensuite les communications présentant l'effet tunnel comme un « outil » et nous donnons une liste rapide des problèmes évoqués dans cette rencontre sur la physique des surfaces. La deuxième partie est formée des résumés des différentes communications présentées à cette école.

I. Présentation expérimentale de l'effet tunnel. —

Dans la conférence d'introduction, I. Giaever a rappelé

les problèmes liés à la réalisation des jonctions et les caractéristiques des jonctions tunnel à couche isolante intermédiaire : métal-isolant-métal ou M-I-M (l'isolant est généralement l'oxyde d'une première électrode métallique). Il a montré que la qualité de la jonction peut être vérifiée grâce à l'apparition d'une importante non-linéarité de la caractéristique $I(V)$ pour des électrodes supraconductrices. Cependant le courant peut perturber lui-même cette mesure par des effets d'échauffement ou par les effets magnétiques qu'il produit. C. A. Mead a présenté une analyse simple de l'effet tunnel dans les barrières de Schottky (structures métal-semiconducteur) et M-I-M. Le courant tunnel est donné par une expression qui indique que celui-ci varie exponentiellement avec l'épaisseur de la barrière. La détermination de cette relation permet de calculer la courbe de dispersion de l'énergie en fonction du quasi-moment de l'électron dans la barrière isolante et d'un paramètre multiplicatif ; ce paramètre dépend de manière sensible des propriétés de l'interface (ce n'est pas le cas pour le facteur exponentiel). Des expériences récentes se sont cependant attachées à décrire des effets fins (mesure des dérivées première et seconde de $I(V)$) au lieu de présenter une étude quantitative des variations du courant. L'interprétation de ces expériences peut être compliquée par l'existence d'étapes intermédiaires (effets d'impuretés) dans la barrière. Une série complète d'expériences a été effectuée dans le cas de barrières de (50-100 Å) fabriquées à partir d'un monocristal de GaSe [4]. À l'aide d'expériences complémentaires (photoréponse, mesure de la capacité d'une barrière de Schottky) une comparaison détaillée de la théorie de l'effet tunnel avec les résultats expérimentaux a été possible. Les paramètres intervenant dans le calcul du courant tunnel et la courbe de dispersion sont ainsi entièrement calculables. Le bon accord avec l'expérience montre ainsi que le mécanisme tunnel contrôle la conduction sur la gamme des tensions utilisées (0-1 V). Remarquons que les tests habituels « de bonnes jonctions » tels que la présence de la bande d'énergie d'un supraconducteur (Giaever) ou du spectre des phonons supraconducteurs (Rowell) à des énergies plus faibles (quelque 10^{-3} V) sont en ce sens plus limités. J. M. Rowell a décrit la variation parabolique de la conductance tunnel de jonctions M-I-M à basse température. Cette variation est observée sur une grande gamme d'énergie car le comportement à basse énergie est compliqué par la présence d'effets inélastiques. En général le maximum de résis-

tance n'apparaît pas à tension nulle même pour les jonctions « théoriquement » symétriques telles que Al-I-Al. Pour décrire cette variation on applique un calcul B. K. W. à un modèle de barrière trapézoïdale. Cependant les hauteurs de barrière et l'asymétrie ainsi obtenues sont trop fortes. (Pour Al-I-Al il faut supposer une asymétrie de 2 eV pour rendre compte de celle obtenue à partir de la mesure de la conductance). Dans l'esprit de la communication de Mead un tel désaccord peut signifier que le mécanisme tunnel vérifié par les propriétés à basse énergie ne décrit pas seul le comportement à des énergies plus élevées.

II. Développements théoriques sur la formulation de l'effet tunnel.

— C. Caroli passe en revue les différentes approches du problème de la résolution de l'équation de Schrödinger à un électron en présence d'une barrière de potentiel : étude de la barrière carrée, utilisation de l'approximation B. K. W. [3], introduction d'un hamiltonien de transfert [5]. Bien que le calcul de perturbation avec l'hamiltonien de transfert soit une méthode plus générale car elle traite le problème d'une assemblée d'électrons en interaction, elle demeure néanmoins insatisfaisante et de nombreux efforts ont été faits pour repenser le problème. Trois approches ont été présentées à l'école : J. Appelbaum et W. F. Brinkman ont introduit un terme de transfert généralisé [6]. C. B. Duke a généralisé la théorie de la réponse linéaire, ce qui lui permet d'inclure les termes d'interaction avec la barrière. Enfin le groupe théorique de l'école normale supérieure présente une description à l'aide des fonctions d'onde de Wannier de l'ensemble électrodes-isolant ce qui permet le calcul des propagateurs du système total (voir communication de R. Combescot).

Bien qu'elle ne soit pas totalement satisfaisante, la formulation de l'hamiltonien de transfert est utilisée pour le classement des structures observées. Duke distingue les effets liés soit à la barrière, soit aux électrodes qui peuvent tous les deux être décrits par des termes distincts de l'hamiltonien. Outre le cas d'électrodes supraconductrices, les interactions des électrons dans l'électrode leur confèrent une self énergie $\sum(\mathbf{k} E)$, traduisant la dispersion et l'atténuation de l'état électronique, qui se reflète sur les caractéristiques tunnel. Les dépendances en $\mathbf{k}$ et E de la partie réelle de $\sum$ se traduisent par des accidents de type « bosse » sur la conductance dynamique. Les interactions inélastiques dans la barrière conduisent à un courant assisté supplémentaire qui se traduit par un accident de type « saut » sur la conductance dynamique avec l'excitation d'un phonon de la barrière ou d'un mode localisé. De même les impuretés peuvent influencer profondément la partie élastique du courant tunnel. En considérant un effet de ce type, J. P. Hurault [7] prévoit un processus résonnant lorsque le niveau de Fermi se trouve en face d'un état lié associé à l'impureté [8].

Un certain nombre de structure tunnel, en particulier

les barrières dopées avec des matériaux magnétiques montrent une dépendance logarithmique de la conductance dynamique en température et en énergie autour de la tension nulle. De plus notons la forte sensibilité avec le champ de cette structure. A. F. G. Wyatt a discuté ces « anomalies » à partir d'une description liée à l'effet Kondo. A. Zawadowski a introduit deux mécanismes de modification de la conductance tunnel par des impuretés magnétiques : en premier lieu, lorsque l'impureté magnétique est dans la barrière ou à l'interface barrière-métal, il apparaît une augmentation de la conductance due à l'effet tunnel assisté par l'impureté ; en second lieu il apparaît un changement de la densité locale des électrons de conduction et ce mécanisme permet de prévoir l'existence d'un pic de résistance important autour de $V = 0$. L'observation des deux mécanismes peut être faite simultanément. L'effet tunnel sur des structures dopées magnétiquement peut être un outil pour l'étude des problèmes magnétiques. Cependant les résultats expérimentaux et en particulier ceux qui mettent en évidence l'augmentation de résistance en tension nulle ont été obtenus dans des conditions mal définies. Par ailleurs dans des structures non magnétiques telles que celles obtenues avec des grains métalliques oxydés au voisinage de la barrière, un effet tunnel à deux étapes utilisant le passage intermédiaire par ces grains permet d'obtenir des anomalies résistives ainsi que l'a rappelé I. Giaever.

III. Utilisation de l'effet tunnel.

— La discussion précédente peut constituer un lien entre l'aspect fondamental de l'effet tunnel et l'aspect « outil » tel qu'il apparaît dans les « anomalies » de conductance fortement non linéaire mais difficilement contrôlables (voir également Jaklevic et Lambe [9]).

L'utilisation de l'effet tunnel demeure liée au problème de la *réalisation des jonctions* qui a été entrevu lors de la conférence d'introduction de I. Giaever. Des barrières isolantes d'oxyde se forment aisément sur certains métaux (Al, Mg, Ni) plus difficilement sur d'autres (Cu, V, Bi) et ne peuvent être formées sur Au et Ag. Enfin dans d'autres cas (In) on forme facilement une couche d'oxyde mais non isolante d'où impossibilité de créer une barrière tunnel. Une table ronde a, par la suite, mis en commun les problèmes rencontrés lors de la préparation des barrières. Pour la préparation des barrières tunnel naturelles, il faut distinguer deux cas selon que l'électrode de base est un film évaporé ou un bloc massif. L'évaporation d'un film donne automatiquement un bon état de surface et l'oxydation peut se faire pour un grand nombre de métaux, soit par simple exposition à l'air, à la température ambiante ou plus élevée [10], soit par oxydation anodique en phase gazeuse [11]. Pour réaliser une jonction sur un matériau à l'état massif, le problème principal est d'obtenir une surface propre et plane avant l'oxydation.

Les barrières artificielles réalisées à l'heure actuelle

peuvent également se diviser en deux groupes. La première méthode consiste à évaporer une couche isolante qui peut éventuellement présenter des trous. On obtient une structure tunnel correcte en oxydant fortement le premier métal servant de support. Remarquons que cette méthode ne présente pas d'intérêt si ce n'est lorsqu'il est possible de montrer que l'effet tunnel se fait effectivement à travers la couche isolante (utilisation d'un corps photosensible tel que CdS [12]). La deuxième méthode consiste à évaporer un métal qui ne sera pas oxydé par ailleurs. Il semble que des résultats satisfaisants aient été obtenus avec le carbone (corps dont la température de fusion est très élevée devant celle du substrat et dont la tendance à coaguler est limitée [13]). L'ensemble de cette discussion a fait apparaître la nécessité d'une approche systématique et plus chimique qui n'a pas été développée dans cette école (mécanisme d'oxydation, absorption...).

Une première utilisation de l'effet tunnel décrite par J. M. Rowell est celle de l'application de l'effet tunnel supraconducteur à l'étude des spectres de phonons des électrodes. La dérivée seconde de la caractéristique $I(V)$ reflète directement la dépendance en énergie de $\alpha^2(\omega) F(\omega)$ où $F(\omega)$ représente la densité d'états des phonons et $\alpha^2(\omega)$ le terme de couplage électron-phonon. Après un rappel des résultats obtenus sur des supraconducteurs à couplage fort (Pb) il a présenté des résultats nouveaux sur des alliages Pb-Tl et $\text{Pb}_{1-2x}\text{Tl}_x\text{Bi}_x$ [14]. Dans les alliages désordonnés la durée de vie finie des phonons entraîne un élargissement du spectre des phonons. Dans les composés intermétalliques la structure du spectre peut être très riche. Les résultats obtenus à partir du spectre de phonons peuvent être reliés aux propriétés supraconductrices par le coefficient :

$$\lambda = 2 \int_0^\infty \frac{\alpha^2(\omega) F(\omega)}{\omega} d\omega$$

qui mesure la force du couplage électron-phonon du supraconducteur. Un exemple est donné dans le cas d'alliages In-Tl [15] : les valeurs expérimentales de T_c peuvent être comparées avec le modèle de Mac Millan (spectre de phonons comparable à celui du Nb) et de Garland (meilleure description des matériaux amorphes qui ont un spectre de phonons plus important à basse énergie).

Dans le cadre de l'effet tunnel supraconducteur, C. J. Adkins a décrit des expériences à plusieurs jonctions tunnel entre des supraconducteurs. Quand une jonction tunnel entre deux supraconducteurs avec des bandes interdites Δ_1 et Δ_2 est polarisée par une tension supérieure à $\Delta_1 + \Delta_2$, le courant s'écoule par un mécanisme qui crée des excitations dans les supraconducteurs. Pour une tension de polarisation inférieure à $\Delta_1 + \Delta_2$, le courant est proportionnel au nombre d'excitations déjà présentes. Les jonctions tunnel peuvent ainsi être utilisées soit pour créer, soit pour détecter des excitations et ce double aspect a été mis en évidence dans plusieurs expériences

où le système utilisé comportait deux jonctions. Le temps de vie des excitations dans Al supraconducteur a été mesuré [16-19] dans des structures formées de 3 films supraconducteurs séparés par deux barrières tunnel. L'effet tunnel entre les films 1 et 2 crée des excitations et la mesure du courant tunnel à travers la seconde barrière pour de faibles tensions indique l'accroissement de la population des excitations qui est proportionnel au temps de vie. C'est une expérience de mesure statique. Dans une autre méthode on peut utiliser une jonction qui joue le rôle du générateur et du détecteur [16]. On peut induire des excitations par une impulsion de courant et la décroissance de l'excès de population ainsi créé est observée directement. Les deux méthodes fournissent des résultats en bon accord avec des calculs détaillés [20]. La diminution du nombre des excitations est généralement liée à la production de phonons d'énergie 2Δ . Ainsi une jonction polarisée par une tension telle que des excitations soient créées, agira comme un générateur de phonons monoénergétiques. Inversement, à partir d'une jonction tunnel polarisée pour détecter des excitations, on peut mettre en évidence des phonons à condition qu'ils aient une énergie suffisamment élevée pour créer des excitations. Initialement des jonctions furent utilisées comme générateur et détecteur de phonons dans une expérience où les phonons étaient transmis et se propageaient dans une petite tige de saphir [21]. Une mesure directe de l'interaction électron phonon est obtenue par l'étude de la transmission à travers des couches minces de métaux normaux. Une étude détaillée de cette méthode, dans laquelle le signal détecté varie avec le potentiel appliqué au générateur fournit des informations sur les processus de perte d'énergie des quasiparticules excitées.

L'utilisation de l'effet tunnel pour étudier la densité d'états supraconductrice dans des structures inhomogènes (supraconducteur en champ magnétique, films supraconducteurs et normaux superposés) est, comme l'a montré E. Guyon, d'un intérêt certain bien que la grande portée des effets supraconducteurs fournit une information fortement non locale. Dans les films purs la variation du paramètre d'ordre supraconducteur induit par proximité donne des effets de résonances géométriques dont l'étude quantitative devrait donner des résultats précieux sur la nature des interfaces. La mesure du courant critique d'une structure formée d'un métal normal disposé entre deux supraconducteurs donne une information sur la supraconductivité induite dans l'électrode normale, comparable à l'information obtenue par effet tunnel. Les trilames constituent un lien entre l'effet de proximité et l'effet Josephson dans les structures où une mince couche isolante est placée entre deux supraconducteurs.

A. Libchaber a discuté les propriétés alternatives des jonctions Josephson en montrant, en particulier, les effets résonnants obtenus par irradiation d'une

jonction par des photons ayant une énergie égale ou multiple de la bande interdite supraconductrice. V. Ambegaokar a donné une présentation phénoménologique [22] de l'effet Josephson utilisant une analogie mécanique permettant de comprendre les effets de résonance de plasmas Josephson et les irréversibilités de courants critiques. A partir d'un rappel des équations de mouvement brownien, il a analysé les problèmes de bruit dans les jonctions Josephson [23]. En régime continu ils causent un arrondissement de la transition entre le régime non dissipatif et dissipatif. En régime alternatif ils entraînent un élargissement fini de la radiation émise sans changer cependant la valeur de la fréquence centrale.

Finalement J. Klein et A. Léger ont discuté l'utilisation de l'effet tunnel non supraconducteur aux études d'effets inélastiques. La modification du courant tunnel due à des interactions « dynamiques » de l'électron au voisinage ou dans la barrière est liée à un effet tunnel inélastique. L'interaction s'effectue avec des modes d'excitations collectives de la barrière ou avec les modes vibrationnels localisés des impuretés qu'elle contient, ceux-ci étant actifs soit en infrarouge, soit en Raman. Dans ces derniers cas on peut montrer que (d^2I/dV^2) est directement proportionnel à la densité spectrale dipolaire ou de polarisabilité (elle détermine également l'absorption infrarouge et l'intensité diffusée Raman). On peut donc s'attendre à une spectroscopie comparable aux précédentes méthodes. Lambe et Jaklevic [9] ont les premiers observé les vibrations caractéristiques des groupements OH, CH, CN, CO... dans des jonctions volontairement dopées avec différentes molécules organiques. Une jonction oxydée à l'air « naturel » présente un spectre fort riche dans lequel on peut identifier les raies (avec une précision relative allant jusqu'à 1 %) correspondant aux différents contaminants de l'air. La sensibilité peut être estimée à 10^{10} molécules ou radicaux. Les résultats permettent d'envisager l'éventuelle utilisation des jonctions comme détecteurs de la pollution atmosphérique. Les modes de vibration de barrières d'oxyde ont aussi été observés [24] et I. Giaever et H. Zeller ont vu les phonons de barrières artificielles amorphes [25]. Il est à noter que dans ces interactions avec les phonons les règles de sélection ne sont pas les mêmes qu'en infrarouge et il n'y a pas de limitation aux modes transverses et à la région $k = 0$. De plus il semble que la spectroscopie tunnel devrait pouvoir donner des renseignements sur la nature des liaisons chimiques dans la barrière, ce qui semble difficilement accessible autrement.

IV. Introduction à l'étude des surfaces. — Dans le but d'encourager les efforts tendant à un meilleur contrôle des structures tunnel c'est-à-dire leur compréhension, un certain nombre d'exposés de physique et de technologie des surfaces ont été présentés. J. L. Domange a montré combien il était difficile d'obtenir et de conserver une surface propre et a défini

les moyens et les paramètres les plus favorables : la ségrégation de surface en particulier est un phénomène souvent négligé. Les techniques de diffraction d'électrons lents et de spectroscopie Auger (M. Perdureau) représentent d'excellents moyens d'analyse géométrique et chimique de la surface. Ces techniques sont habituellement couplées in situ. La compréhension fine des intensités des tâches de diffraction et des mécanismes inélastiques est malheureusement très sommaire. Le LEED permet la détection de dépôts d'atomes ou de molécules sur une face monocristalline seulement s'il existe un ordre. La spectrométrie Auger quantitative pose de même un certain nombre de problèmes. La sensibilité de ces techniques à des perturbations mécaniques ou chimiques localisées sur une épaisseur de 10 Å représente un intérêt considérable pour le contrôle des interfaces et des surfaces sur lesquelles on désire former ultérieurement une barrière tunnel.

La présence de surfaces limites modifie les états électroniques et les excitations collectives des solides comme cela a été rappelé par J. Friedel. L'étude de la structure des surfaces peut être divisée en deux parties. D'une part on peut étudier la structure et les excitations des atomes, d'autre part les électrons. L'analyse des phonons peut être faite en tenant compte des conditions aux limites (surface libre ou bloquée) et permet la mise en évidence des états de surface. Les excitations électroniques individuelles sont analysées et cette étude montre qu'une surface introduit des variations spatiales de la densité électronique. Il est à noter que le comportement électronique dans un métal est sensible aux détails du potentiel de surface car la longueur d'onde de Fermi est d'une grandeur comparable aux accidents atomiques de la surface. De plus une discussion qualitative sur les atomes adsorbés est présentée.

La visualisation de la surface réelle peut être obtenue par le microscope à balayage (G. Fontaine) avec une résolution de 300 Å et des inhomogénéités de taille très faible (~ 20 Å) peuvent être mises en évidence par la microscopie électronique (B. Jouffrey) sur des films ou des monocristaux minces. Il faut souligner la simplicité de la visualisation par le microscope à balayage dont l'utilisation se développe beaucoup actuellement. D'autres méthodes permettent d'identifier de faibles quantités d'impuretés ($\lesssim 1$ ppm) et d'obtenir approximativement le profil de concentration au voisinage d'une interface. Ainsi J. F. Hennequin a présenté les techniques de pulvérisation cathodique et d'émission ionique secondaire dont la résolution peut être estimée à environ 50 Å [26]. Les expériences sont actuellement d'interprétations délicates en raison de la faible connaissance des taux de pulvérisation. Dans le cas particulier d'hétérojonctions GaAs/Ge par exemple, cette méthode a pu donner des profils de diffusion sur des portées spatiales où intervient l'effet tunnel. G. Amsel a présenté une technique complémentaire de microanalyse nucléaire. Une réaction

nucléaire sur un élément spécifique situé au voisinage d'une surface solide permet de doser cet élément à partir des produits secondaires de la réaction. Cette méthode permet de mesurer de faibles quantités d'un élément (fraction de monocouche) ainsi que d'estimer la profondeur où se trouve cet élément en utilisant la perte d'énergie et les variations de la section efficace de la réaction avec l'énergie. Ces techniques peuvent donner accès à la composition de couches minces (oxydes par exemple) ou renseigner sur l'interdiffusion des composants d'un bilame.

Une présentation des propriétés optiques des solides en couches minces et des surfaces solides a été donnée par M. L. Theye. Elle a discuté en particulier l'utilisation de l'ellipsométrie à l'étude de la pollution des surfaces ainsi qu'à celle de la croissance des couches d'oxyde mince. Une telle technique est cependant suspecte quant à une utilisation quantitative lorsqu'elle s'adresse à des fractions de monocouches. L'utilisation de figures d'interférence de faisceaux de rayons X rasants permet des mesures absolues et précises des épaisseurs de couches très minces.

M. Dreschler a discuté les problèmes et possibilités de l'émission de champ sous vide qui constitue probablement une des utilisations les plus intéressantes de l'effet tunnel. Elle s'adresse à une surface monocristalline, permet de localiser un seul atome (Clark, Young, Plummer) et de faire des études dynamiques d'évolution de surface. Les courants émis à partir des faces cristallines au bout d'une pointe de W sont mesurés en fonction de la force du champ (tension anodique). Les résultats expérimentaux sont comparés au modèle de Fowler Nordheim et permettent des mesures du travail d'extraction en fonction de l'orientation du cristal. Il est possible d'obtenir des données sur l'adsorption en remarquant que la présence d'atomes adsorbés modifie le travail d'extraction. Les données sont : le degré de recouvrement qui peut être mesuré à partir du travail d'extraction ou encore en comptant les atomes visibles au microscope ; le moment dipolaire des atomes adsorbés ; l'énergie d'adsorption de molécules sur une face monocristalline ; la diffusion de surface en suivant le déplacement des atomes adsorbés en fonction du temps ; la masse d'atomes adsorbés par des mesures de temps de vol. Remarquons que la présence d'un champ élevé à la surface modifie les propriétés du solide.

La photoémission (J. Van Laar) peut être utilisée dans l'étude des structures de bandes et de leur courbure au voisinage de la surface. Cette technique doit en principe donner accès aux processus de diffusion des électrons dans une couche très mince ($\sim 100 \text{ \AA}$) au voisinage de la surface. La théorie de ces phénomènes est cependant très rudimentaire. Cette méthode permet également la mesure de la variation du travail d'extraction pour de très faibles quantités d'impuretés adsorbées (monocouche).

Peu d'expériences ont permis, jusqu'à présent, de mettre en évidence les excitations de surface. L'exem-

ple des plasmons de surface observés par excitation optique a été présenté par M. L. Theye. Les phénomènes principaux que les techniques précédentes étudient, peuvent être classifiés de la manière suivante et non exhaustive.

— identification d'impuretés (Auger, Rayons X, pulvérisation cathodique, micro-analyse nucléaire...),

— visualisation de la géométrie de surface (LEED, microscope à émission d'ions) et des inhomogénéités (microscopie électronique),

— influence ou étude de l'adsorbat (photo-émission, LEED, émissions de champ...),

— observation d'excitations de surface (LEED, excitation U. V., ...),

— ordre de grandeur des épaisseurs (LEED, ellipsométrie, capacité, rayons X, méthodes micropondérales...).

L'interprétation fine des résultats d'effets tunnel se heurte fréquemment à la méconnaissance physicochimique des structures réalisées. L'intérêt d'un contrôle utilisant l'une ou l'autre de ces techniques apparaît clairement en plus des expériences plus routinières de photoréponse et de capacité. La détection d'impuretés dans une structure tunnel, leur localisation et la mesure de leur quantité peuvent être envisagées à l'aide des techniques de haute résolution. Si les barrières d'oxyde présentent de sérieux problèmes quant à la forme et à la structure, les barrières métal-semiconducteur semblent à ce point de vue beaucoup mieux définies et se prêteront aisément à un contrôle ultrafin de leur propriété cristalline et chimique (LEED et Auger). On peut ainsi envisager, à condition de développer des expériences couplées, que l'effet tunnel dans les solides peut à l'avenir apporter une contribution non négligeable à la physique des surfaces en particulier dans deux domaines limites qui sont importants tant d'un point de vue fondamental que pour leurs applications : l'étude des couches continues isolantes (oxydation, passivation,...) et l'étude de l'impureté isolée sur une surface (catalyse hétérogène) à partir de l'émission de champ.

Bibliographie

- [1] ESAKI (L.), *Phys. Rev.*, 1958, **109**, 603.
- [2] GIAEVER (I.), *Proceedings VII International Conference on Low Temperature Physics*, Toronto, 1960, Univ. of Toronto Press, 1961, p. 327.
- [3] Livre de BURSTEIN (E.), LUNDQVIST (S.), *Tunneling phenomena in solids*, Plenum Press, New York, 1970.
- [4] KURTIN (S.), MEAD (C. A.), *J. Phys. Chem. Solids*, 1969, **30**, 2007.
- [5] BARDEEN (J.), *Phys. Rev. Letters*, 1961, **6**, 57.
COHEN (M. M.), FALICOV (L. M.), PHILIPS (J. C.), *Phys. Rev. Letters*, 1963, **8**, 316.
HARRISON (W. A.), *Phys. Rev.*, 1961, **123**, 85.
- [6] APPELBAUM (J.), BRINKMAN (W. F.), *Phys. Rev.*, 1969, **186**, 464.
- [7] HURAUULT (J. P.), *Phys. Rev.*, 1969, **185**, 592.

- [8] GADZUCK (J. W.), *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**, 286. Dans cet article on trouve un certain nombre de références intéressantes.
- [9] JAKLEVIC (R. C.), LAMBE (J.), *Phys. Rev. Letters*, 1966, **17**, 1139 ; *Phys. Rev.*, 1968, **165**, 821.
- [10] ROWELL (J. M.), SHEN (L. Y. L.), *Phys. Rev. Letters*, 1966, **17**, 15.
- [11] MILES (J.), SMITH (P.), *J. Electrochem. Soc.*, 1963, **110**, 1240.
- [12] GIAEVER (I.), *Phys. Rev. Letters*, 1968, **20**, 1286.
- [13] McVICAR (M. L. A.), FREAKE (S. M.), ADKINS (C. J.), *J. Vacuum Sci. Technol.*, 1969, **6**, 717.
- [14] ROWELL (J. M.), McMILLAN (W. L.), FELDMANN (W. L.), *Phys. Rev.*, 1969, **178**, 897.
DYNES (R. C.), ROWELL (J. M.), *Phys. Rev.*, 1969, **187**, 821.
- [15] DYNES (R. C.), à paraître.
- [16] GRAY (K. E.), LONG (A. R.), ADKINS (C. J.), *Phil. Mag.*, 1969, **20**, 273.
- [17] LEVINE (J. L.), HSIEH (S. Y.), *Phys. Rev. Letters*, 1968, **20**, 994.
- [18] MILLER (D. I.), DAYEM (A. M.), *Phys. Rev. Letters*, 1967, **18**, 1000.
- [19] TAYLOR (B. N.), Thèse, Université de Pennsylvanie, 1963.
- [20] GRAY (K. E.), *Phil. Mag.*, 1969, **20**, 267.
- [21] EISENMENGER (W.), DAYEM (A. H.), *Phys. Rev. Letters*, 1967, **18**, 125.
- [22] JOSEPHSON (B. D.), dans « Superconductivity » (Ed. R. D. Parks), p. 423, Marcel Dekker, Inc., New York, 1969.
- [23] KURKIJARVI (J.), AMBEGAOKAR (V.), *Phys. Letters*, 1970, **31a**, 314.
- [24] ROWELL (J. M.), McMILLAN (W. L.), FELDMANN (W. L.), *Phys. Rev.*, 1969, **180**, 658.
- [25] GIAEVER (I.), ZELLER (H. R.), *Phys. Rev. Letters*, 1968, **21**, 1385.
- [26] SŁODZIAN (G.), *Rev. Phys. Appl.*, 1968, **3**, 360.