

# Physique des spins dans les semi-conducteurs désordonnés

Autor(en): **Solomon, I.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **58 (1985)**

Heft 1

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-115585>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## PHYSIQUE DES SPINS DANS LES SEMI-CONDUCTEURS DESORDONNES

I. Solomon, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau, France

Le sujet de cet exposé fait l'objet d'une monographie détaillée (en anglais) dans le Chapitre 7, TOPICS IN APPLIED PHYSICS, volume 36, Amorphous Semiconductors (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1979), Editor M.H. Brodsky. Nous nous contenterons donc d'un cours résumé donnant le plan de l'exposé et les références principales.

### I. Les semi-conducteurs désordonnés

Les propriétés physiques des semi-conducteurs désordonnés, dont l'exemple le plus typique est le silicium amorphe déposé en couches minces par évaporation ou par pulvérisation cathodique [1] sont entièrement dominés par les défauts.

Un défaut qui existe toujours est la liaison cassée ("dangling bond"): il est topologiquement impossible de réaliser un "réseau" désordonné et en même temps de satisfaire toutes les liaisons, ce qui n'est réalisé que dans le cristal parfait (Fig. 1).

C'est ainsi que le silicium évaporé pur contient un très grand nombre de ces liaisons cassées, typiquement de  $10^{19}$  à  $10^{20}$  par  $\text{cm}^3$ . Ces liaisons introduisent un si grand nombre d'états dans la bande interdite que celle-ci n'existe plus: le silicium amorphe pur n'est pas un semi-conducteur.

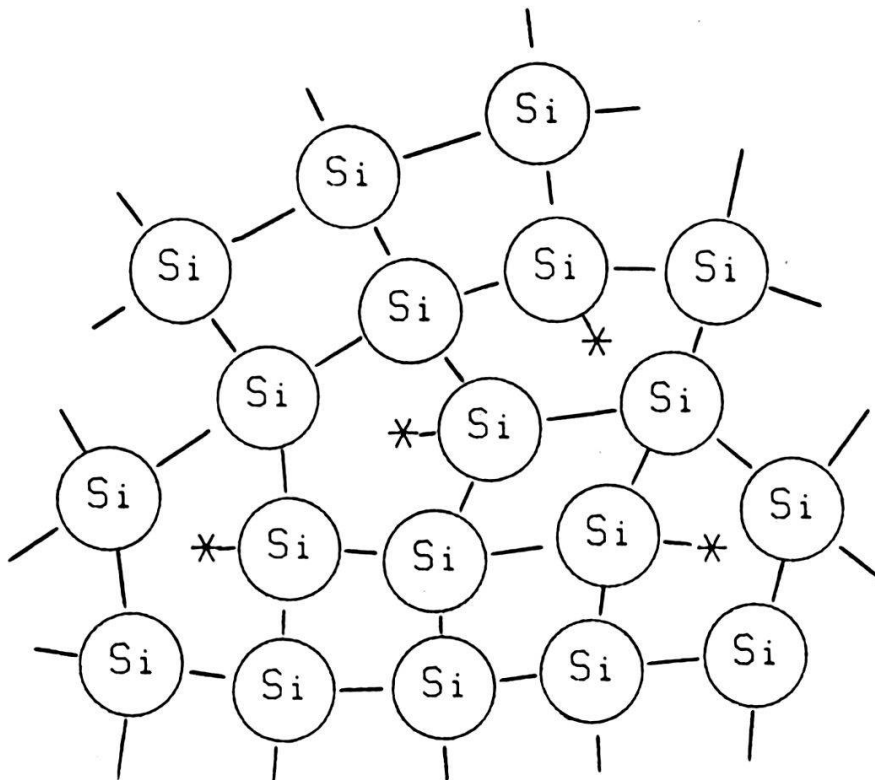


Fig. 1: Description schématique d'un réseau de silicium amorphe. La déformation par rapport au cristal parfait produit des liaisons non satisfaites (marquées \*). En présence d'hydrogène atomique produit, par exemple, dans la décomposition du silane  $\text{SiH}_4$  dans un plasma, cet hydrogène se place sur les liaisons "cassées" et ainsi toutes les liaisons dans le matériau sont satisfaites.

Un gros progrès a été obtenu en 1976 [2] en produisant des couches de silicium amorphe hydrogéné par décomposition du gaz silane,  $\text{SiH}_4$ , dans un plasma. L'hydrogène atomique, provenant de la décomposition du silane, réalise des liaisons covalentes avec les liaisons cassées et presque toutes les liaisons se trouvent ainsi satisfaites: la densité de défauts dans le meilleur silicium amorphe hydrogéné descend au niveau de quelques  $10^{15}$  par  $\text{cm}^3$ , soit une amélioration de près de 5 ordres de grandeurs par rapport au silicium amorphe pur.

Ce matériau ainsi obtenu a de bonnes propriétés semi-conductrices. Il reste toutefois des défauts que la résonance paramagnétique électronique

(RPE) permet d'étudier en détail.

On distingue en gros deux types de défauts dans ce matériau:

- Les défauts ponctuels, dont le type est la "liaison cassée". Ces défauts, qui possèdent un électron non apparié, sont toujours paramagnétiques et relèvent bien de l'étude par RPE.
- Les défauts étendus, qui mettent en cause plusieurs sites atomiques et qui peuvent être diamagnétiques ou paramagnétiques suivant leur état de charge, c'est-à-dire suivant la position du niveau de Fermi. Lorsque le nombre d'électrons d'un tel défaut est pair, on n'obtient pas de signal de résonance direct. On peut obtenir toutefois un signal par la technique de la photoconductivité dépendante du spin qui sera décrite plus loin.

Le monumental travail effectué par G. Watkins et son équipe [3] sur la RPE des défauts obtenus par irradiation dans le silicium cristallin a servi de guide pour l'identification des défauts dans le silicium amorphe et reste la technique la plus puissante pour l'étude des propriétés locales du silicium amorphe.

## II. Physique des spins dans les semi-conducteurs désordonnés

Il a été reconnu depuis longtemps [4] que les propriétés de spin des porteurs peuvent avoir un effet important dans les semi-conducteurs. Dans le silicium amorphe hydrogéné, ces effets peuvent être spectaculaires puisque les propriétés de transport peuvent être affectés de plusieurs pourcents, même à température ordinaire.

Tous ces résultats sont basés sur l'effet de pompage des états triplets lors de l'injection de porteurs, le cas typique étant l'injection par irradiation lumineuse d'énergie supérieure à la bande interdite (photoconductivité intrinsèque). Dans une telle irradiation les spins des porteurs (électrons et trous) photocréés sont complètement au hasard. Après recombinaison d'une paire électron-trou, le spin total est évidemment nul. Par conséquent, aux interactions spin-orbite près (qui sont très faibles dans le silicium), seules peuvent se recombinaison les paires qui ont un spin total nul, c'est-à-dire les états singulets. Il en résulte, à l'équilibre dynamique, un surplus important d'états triplets, dont la recombinaison est interdite.

Tout effet qui détruit l'état du spin des états triplets ainsi

"pompés", va accélérer la recombinaison et va pouvoir être détectée par une variation de la (photo-)conductivité du matériau. Ceci peut être réalisé de trois manières possibles [5]:

1) Par saturation d'un des spins (trou ou électron) qui induit des transitions rapides de ce spin, ou détruit l'état triplet, ce qui se traduit par une variation résonnante de la photo-conductivité. Cette méthode de détection est extrêmement sensible, puisque il est facile de détecter de cette manière  $10^4$  à  $10^5$  spins, soit 6 à 7 ordres de grandeurs d'augmentation de sensibilité par rapport aux méthodes de résonance classiques.

2) Par application d'un champ magnétique ("Effet Hanle"). Comme les valeurs du facteur gyromagnétique ("g-value") des électrons et des trous sont différents, en présence d'un champ magnétique ils vont précesser à une vitesse angulaire légèrement différente. Au bout d'un moment l'orientation relative des deux spins sera détruite, et l'état triplet sera détruit. C'est ainsi que par application d'un champ magnétique de quelques centaines de gauss, on obtient dans le silicium amorphe une variation de photoconductivité due aux spins qui peut dépasser 1%.

3) Un autre effet, plus subtil, est la destruction des états triplets par mélange thermique de l'interaction Zeeman avec l'interaction dipole-dipole. Avec un surplus de triplets, cette dernière interaction est très "froide". A un champ magnétique suffisamment faible (de l'ordre de la largeur de raie, soit quelques gauss) l'interaction dipole-dipole très "froide" entre en contact thermique avec l'interaction Zeeman "chaude" et une grande partie des états triplets pompés est détruite. Il en résulte un spectaculaire effet de magnéto-résistance à champ très faible dont la cause est restée longtemps mystérieuse pour les physiciens des semi-conducteurs.

### III. Conclusion

Le domaine des semi-conducteurs désordonnés, bien que récent, a déjà pris une extension considérable. Les applications industrielles des couches minces de silicium, en particulier pour la fabrication de photopiles solaires, représentent déjà un chiffre d'affaire important et font travailler plusieurs centaines de personnes dans le monde. Toutefois, les problèmes fondamentaux sont loin d'être réglés, et il reste beaucoup à comprendre sur la nature et

les propriétés de ces matériaux. La résonance magnétique, qui a été cruciale dans les premiers stades de l'étude du silicium amorphe, reste un outil privilégié pour des recherches en profondeur sur la nature de ce matériau.

#### Références

- [1] Brodsky M.H., Title R.S., Weiser K., Petit G.D. (1970). Phys. Rev. B1, 2632.
- [2] Spear W.E., Le Comber P.G. (1976). Phys. Mag. 33, 939.
- [3] Watkins G.D., Corbett J.W. (1965). Phys. Rev. 138, A543.
- [4] Honig A. (1966). Phys. Rev. Lett. 17, 186.  
Lépine D. (1972). Phys. Rev. B6, 436.
- [5] Solomon I. (1983). Bull. Mag. Res. 5, 118.