

Faire la lumière sur les centres des diamants

X. Element^{a)}

(Dated: 8 août 2016)

Les diamants sont un matériau fascinant de plusieurs manières de par leurs caractéristiques optiques, leur dureté, leur isolation électrique et leur conductivité thermique. De nos jours, grâce à la théorie quantique, les diamants sont dotés d'une nouvelle caractéristique qui leur permet d'être utilisés comme détecteur de champ magnétique de très faible intensité. Une des bases importantes de ce détecteur de champ magnétique repose sur l'utilisation de la photoluminescence du diamant.

I. INTRODUCTION À LA PHOTOLUMINESCENCE

Qu'est-ce qu'est la photoluminescence ? Tout d'abord, il faut parler de luminescence. La luminescence est la propriété d'un matériau à émettre de la lumière après avoir absorbé une forme d'énergie. L'électroluminescence est l'émission de lumière par stimulation électrique et la photoluminescence par stimulation lumineuse. Un exemple bien connu de photoluminescence est la phosphorescence. C'est comme lorsqu'il y a des étoiles collées au plafond d'une chambre d'enfant et qui durant la journée est exposées à la lumière et qui une fois le soir venu, émettent une petite lueur pour le bonheur des enfants. La phosphorescence est une luminescence lente et dans le cas des centres NV du diamant, la photoluminescence est rapide et est nommée fluorescence.

Commençons par bien comprendre la photoluminescence avant de voir son application aux centres NV. Ce phénomène se comprend bien à l'aide de la mécanique quantique et d'un diagramme de bande d'énergie voir figure 1. Ce qu'il faut savoir de la mécanique quantique pour bien comprendre est relativement simple. L'énergie est quantifiée, c'est-à-dire qu'un électron par exemple peut avoir un niveau d'énergie ou bien un autre, mais ne peut pas avoir une énergie entre les deux niveaux. C'est semblable à des marches d'un escalier. On peut monter les marches, on peut les descendre, mais on ne peut se tenir entre deux marches. Pour les électrons, les marches sont en fait de l'énergie. Ceci implique qu'il y a présence d'un gap dans les matériaux où il est donc impossible pour un électron d'avoir cette énergie. Ici le gap correspond à la hauteur d'une marche. Alors, pour monter d'un niveau l'électron doit avoir plus ou autant d'énergie que la grandeur du gap. Il en est de même lorsque l'électron doit perdre de l'énergie pour descendre à son niveau fondamental ; il perd une énergie équivalente à celle du gap.



FIGURE 1. Diagramme de bande d'énergie. Dans le cas des centres NV l'énergie de stimulation est sous la forme lumineuse d'un laser vert 532nm et le gap à une énergie correspondant à la couleur rouge 637nm

Pour caractériser un matériau, il est possible d'effectuer des mesures de photoluminescence. On prend le matériau, ici notre échantillon de diamant, et on l'illumine avec une source laser ayant une énergie supérieure à l'énergie du gap. L'échantillon sous l'illumination va commencer à émettre de la lumière qui sera collectée par un système de lentille. Cette lumière émise par notre échantillon est alors focalisée dans un spectromètre. Un spectromètre sert à séparer la lumière et analyser l'intensité de cette lumière à différente longueur d'onde. On peut donc savoir à quelle longueur d'onde il y a le plus d'intensité et donc à quelle longueur d'onde les électrons émettent le plus de lumière dans notre échantillon. Ce qu'il faut savoir c'est que l'énergie de la lumière varie selon la longueur d'onde. Une longueur d'onde plus basse aura une lumière plus énergétique et une longueur d'onde plus élevée aura moins d'énergie. En résumé, en sachant à quelle longueur d'onde notre échantillon émet le plus nous indiquera la valeur de l'énergie du gap. Pour ce qui est des centres NV du diamant, l'énergie lumineuse envoyée sur le diamant est sous forme d'un laser de couleur vert (énergie plus élevée que la gap) et la lumière qu'émet

^{a)}Département de Physique, Université de Sherbrooke.

le diamant est de couleur rouge (énergie du gap).

A. Photoluminescence Résolue en Temps (PLRT)

Pour pousser la caractérisation des matériaux plus loin encore, il est possible de déterminer le temps de vie des porteurs c'est-à-dire à quelle vitesse les l'électron se recombine avec des trous dans un semi-conducteur. Que sont les trous? Lorsque l'on excite un électron et qu'il monte d'un niveau d'énergie, il amène sa charge négative avec lui. Si l'endroit d'où l'électron provenait était neutre, l'endroit devient donc positif après le départ de l'électron pour conserver la charge. Les trous sont donc l'espace positif laissé par le départ de l'électron, mais lorsque l'électron revient, il se recombine avec le trou. Le temps que met un électron pour se recombinaison avec un trou est appelé temps de recombinaison et ce temps est une caractéristique essentielle à connaître lorsque l'on travaille avec des semi-conducteurs pour faire des appareils tel que des photodiodes ou bien des transistors que l'on retrouve dans les ordinateurs et téléphones cellulaires.

La PLRT consiste à séparer un laser qui est pulsé en deux branches. L'une va sur l'échantillon à caractériser, et l'autre va dans une ligne à délai qui sert à allonger le parcours du laser. Le fait d'avoir le contrôle sur la longueur du parcours de la deuxième branche nous donne le contrôle sur le temps puisque l'on connaît la vitesse de la lumière. Donc en allongeant le parcours, on ajoute un délai en temps généralement autour de la picoseconde. Par la suite en recombinaison la lumière issue de la photoluminescence de la première branche au laser de la deuxième branche, on est capable en modifiant le délai d'en retirer le temps de vie ou de recombinaison des porteurs.

II. LES CENTRES NV DU DIAMAND

Tout d'abord, les centres NV du diamant se nomme ainsi à cause des impuretés présentes dans le diamant. En effet, les agencements de carbone ont été modifiés pour avoir un atome d'azote dont le symbole chimique est représenté par un N lié à un atome de carbone qui est également lié à une lacune, c'est-à-dire un vide. En anglais, le terme est "Vacancy" et c'est pour ces raisons que le nom est centre NV.

A. Implantation

Les diamants ayant des centres NV sont fabriqués de plusieurs façons. Les deux principales sont par déposition de vapeur chimique (CVD) et par haute pression à haute température (HPHT). Ces méthodes permettent de créer des diamants avec des impuretés d'azote. Il est

important qu'il y ait des impuretés d'azote sinon le diamant n'agira pas comme on le souhaite. Pour ajouter des lacunes, on envoie des électrons à de très hautes énergies et si l'électron possède assez d'énergie lorsqu'il rentre en contact avec l'atome de carbone, ce dernier sera alors délogé et laissera une lacune derrière lui. Un logiciel gratuit nommé SRIM Stopping and Range of Ions in Matter permet de faire des simulations d'implantation de différent type d'ion. Il n'y a pas seulement des électrons qui peuvent créer des lacunes, mais toutes les sortes d'ions possibles. Le plus simple est évidemment l'ion H^+ ou bien des ions d'azote qui viendrait ajouter des impuretés en plus de faire des lacunes. Les méthodes les plus utilisées sont celles avec l'électron et l'ion d'hydrogène. Le problème avec l'implantation d'ions est que les lacunes se concentrent à un endroit dans le matériau alors pour faire une concentration continue de lacunes dans le matériau il faut usé d'ingéniosité. Pour surmonter cet obstacle, notre groupe de recherche a pensé à deux méthodes envisageables. La première consiste à faire plusieurs implantations et donc il y aura plusieurs concentrations à différents endroits dans le matériau et avec du chauffage, les concentrations devraient s'uniformiser. La deuxième consiste à envoyer le pic de concentration dans un autre matériau collé sur notre diamant et d'utiliser la partie uniforme dans le diamant, bien que la partie uniforme soit de plus petite concentration, il suffit d'envoyer plus d'ions pour l'augmenter. Voir la figure 2 pour voir un exemple d'implantation.

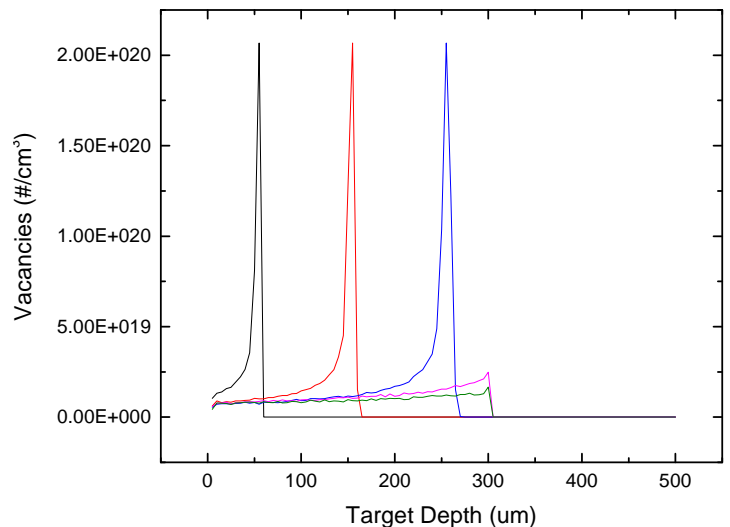


FIGURE 2. Les trois premier pics représentent la première méthode et les deux pics suivant représentent la deuxième méthode où l'on garde seulement la partie en bas à gauche des pics.

B. Photoluminescence et centre NV

Rendu à ce point il est possible que vous vous demandiez quel est le lien entre la photoluminescence et les centres NV du diamant. Il se trouve qu'en envoyant une certaine valeur de micro-onde sur le diamant, l'électron plutôt que de revenir à son niveau initial en émettant un photon, se trouvera plutôt à passer par un chemin dit chemin obscur dans lequel il n'émet pas de lumière, mais émet plutôt des phonons. Alors en faisant de la photoluminescence, lorsqu'il y a une baisse de l'intensité de photoluminescence, on en déduit que nous sommes à une valeur critique de fréquence micro-ondes. Alors en balayant en fréquence, on trouvera une certaine fréquence micro-onde ou il y aura moins de lumière issue de la photoluminescence.

Mais où le champ magnétique entre-t-il en jeu ? Lors du balayage en fréquence sans champ magnétique, il y a un pic de noirceur, mais lorsque l'on applique un champ magnétique ce pic de noirceur vient se séparer en deux pics de noirceur et plus le champ magnétique est intense, plus ces deux pics s'éloignent en fréquence l'un de l'autre. On peut donc connaître la valeur du champ magnétique en connaissant la différence en fréquence entre les deux pics de noirceurs voir la figure 3.

Les centres NV du diamant peuvent donc servir de détecteur de champ magnétique, et ce même à température pièce. Généralement, lorsque l'on parle d'application quantique tel que la supraconductivité, les températures se situent bien en dessous de la température pièce, en

fait, elles se trouvent même plus basses que la plus froide température naturelle de notre planète. Il est donc incroyable que ce détecteur puisse marcher à température pièce. Dans les bonnes conditions, ce détecteur de champ magnétique pourrait mesurer des champs magnétiques allant jusqu'aux picoteslas.

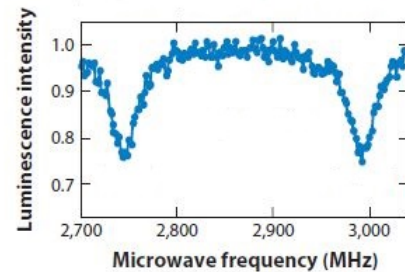


FIGURE 3. Séparation des pics de noirceur à l'application d'un champ magnétique de 4.4mT

III. CONCLUSION

En conclusion, les centres NV du diamant pourront permettre à l'humain de se doter d'un nouveau détecteur de champ magnétique fonctionnant en température pièce et pouvant mesurer des champs magnétiques allant jusqu'au picotesla. Toute cette technologie repose sur une base essentielle qui sert également à faire de la caractérisation de matériau la photoluminescence.