

Avant-propos

À l'échelle nanométrique, les propriétés de la matière ne peuvent pas être expliquées par les lois de la physique classique. Pour construire des modèles capables d'interpréter les propriétés de la matière à cette échelle, il est nécessaire de s'appuyer sur les principes de la mécanique quantique. Les concepts radicaux de la mécanique quantique et le développement des nanotechnologies ont contribué à faire émerger une ingénierie quantique et une science de l'information quantique.

L'ingénierie quantique inclut des matériaux et des capteurs très sensibles ouvrant de nouveaux champs d'applications, des systèmes de mesure sensibles au nanomètre basés sur la photonique et des systèmes de communication performants en termes de sécurité. L'informatique quantique inclut les ordinateurs quantiques et le développement de nouveaux algorithmes. Les ordinateurs quantiques sont constitués de systèmes quantiques à deux niveaux d'énergie qui suivent les mêmes lois de comportement que des atomes ou des électrons ouvrant ainsi par le développement d'algorithmes quantiques des performances de calcul que l'on ne peut pas atteindre avec les ordinateurs classiques. Les technologies quantiques, les nanotechnologies et les nanosciences sont identifiées comme les sources d'innovations de rupture qui vont apporter les technologies considérées comme primordiales au XXI^e siècle.

Le but de cet ouvrage est de diffuser les connaissances essentielles qui conduiront à des applications industrielles de l'ingénierie quantique et des nanotechnologies. Les auteurs, par leurs compétences et expériences, associent un savoir-faire en physique fondamentale, en sciences pour l'ingénieur et en activités industrielles. Cet ouvrage, qui s'inscrit dans la série « Fiabilité des systèmes multiphysiques », est conçu pour donner les applications du volume 2 de cette série intitulé *Défauts à l'échelle nanométrique en lumière polarisée*.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants de master et de doctorat, aux élèves-ingénieurs, aux enseignants et chercheurs en sciences des matériaux et étude expérimentale ainsi qu'aux industriels de grands groupes et des PME des secteurs de l'électronique, de l'informatique, de la mécatronique ou des matériaux optiques ou électroniques.

Le chapitre 1 traitera des systèmes optiques permettant de faire des mesures à l'échelle nanométrique : la cavité de Fabry-Pérot, l'interférométrie homodyne, l'interférométrie hétérodyne, le lambda-mètre optique, l'ellipsométrie avec analyseur tournant. L'accent sera mis sur les applications à travers des exercices ou l'analyse de résultats d'études sur l'emploi des techniques liées aux interférences pour étudier la matière et les matériaux.

Le chapitre 2 présentera des modèles de physique quantique décrivant la façon dont un système quantique à deux niveaux d'énergie interagit avec son environnement. Comme une particule libre comme l'électron interagit avec un champ magnétique extérieur par son spin, la dérivation du concept de spin à partir de l'équation de Dirac sera expliquée et fera l'objet d'un exercice d'application. Le concept de matrice densité (définition, propagation, équation du mouvement) sera ensuite présenté et appliqué à un système laser à deux niveaux d'énergie et à un ensemble d'atomes en interaction avec le champ électrique oscillant d'une onde électromagnétique. Enfin le modèle phénoménologique d'Ising sera présenté et fera l'objet d'un exercice d'application.

Le chapitre 3 aura pour objectif de fournir des bases théoriques et des exemples d'applications permettant de comprendre le fonctionnement d'une porte quantique. Un rappel sera donné sur la modélisation de la lumière en mécanique quantique et sur la représentation par la sphère de Bloch des états d'un système quantique à deux niveaux. Le fonctionnement d'un ordinateur quantique sera introduit. Des exemples d'applications montreront comment utiliser la sphère de Bloch, prédire l'évolution d'un état initial du système et obtenir par un couplage les oscillations de population de Rabi. Une autre application étudiera le couplage d'un atome avec un rayonnement lumineux et l'effet sur les oscillations de Rabi d'un désaccord entre la fréquence de l'atome et la fréquence du rayonnement. Un dernier exercice traitera de l'obtention de franges de Ramsey et de leur application au fonctionnement d'une porte quantique.

Le chapitre 4 présentera enfin une méthode d'optimisation fiabiliste (RBDO) de structures mécaniques. Cette méthode garantit un équilibre entre le coût de définition du système et l'assurance de sa performance dans les conditions d'emploi prévues. Elle est basée sur la prise en compte des incertitudes et sur la résolution simultanée de deux problématiques : optimiser le coût de réalisation des structures réalisant les

fonctions attendues tout en assurant une probabilité suffisante de fonctionnement dans les conditions d'emploi (fiabilité). La méthode RBDO sera appliquée à l'optimisation des paramètres de plusieurs composants mécaniques et d'un circuit imprimé de carte électronique, et à assurer la fiabilité de l'estimation de la mesure des propriétés mécaniques d'une structure en nanotube de carbone (module de Young).

Introduction

La mécanique quantique est basée sur des postulats qui permettent de décrire des phénomènes physiques à l'échelle de l'atome. Les particules élémentaires qui entrent en jeu à cette échelle de mesure ont des dimensions qui sont bien dessous du nanomètre. Le rayon classique de l'électron est $2,8179 \cdot 10^{-15}$ m ou $2,8179 \cdot 10^{-6}$ nm. Le rayon de Bohr de l'atome d'hydrogène est égal à $5,29 \cdot 10^{-11}$ m ou $5,291 \cdot 10^{-2}$ nm. Les mesures à l'échelle nanométrique peuvent être réalisées dans un interféromètre en utilisant les phénomènes d'interférences de la lumière. Les techniques de spectroscopie interférentielle homodyne et hétérodyne par une sélection de longueurs d'ondes par la fréquence de la modulation interférométrique permettent de faire des mesures à l'échelle du nanomètre.

La mécanique quantique introduit pour les particules quantiques (photons, électrons, atomes, molécules, etc.) les notions de superpositions d'états et d'intrication quantique. Les électrons et les atomes peuvent se trouver dans différents états au même instant puisqu'une fonction d'onde décrivant un état peut être la superposition linéaire de plusieurs états purs. Le phénomène d'intrication quantique s'applique également à l'électron. La relation de De Broglie entre la quantité de mouvement p et la longueur d'onde λ , $p = h/\lambda$ a permis d'associer une onde à toute particule. L'électron qui est une particule (localisée) est accompagnée d'une onde (délocalisée). On peut observer des phénomènes d'interférence avec des électrons comme avec des photons. Le phénomène d'intrication quantique et de non-localité a été vérifié dans les expériences d'Alain Aspect sur les photons polarisés [ASP 82]. Les résultats des expériences ont montré la violation des inégalités de Bell qu'auraient dû respecter les mesures dans le cadre d'une théorie déterministe locale à variables cachées et ont contredit le paradoxe EPR (Einstein Podolski Rosen) qui conduisait au principe de localité et sur une description incomplète de la réalité par une fonction d'onde.

On peut illustrer le phénomène d'intrication quantique en considérant une source qui émet deux photons dans des directions opposées. Ces photons, étant issus d'une même source, sont intriqués. Si l'un porte un moment angulaire dans une direction $+z$ par exemple, le moment angulaire de l'autre est forcément orienté selon $-z$. Mesurer le moment angulaire de l'un donne ainsi accès à la connaissance du moment angulaire de l'autre sans avoir besoin de mesurer. La mesure du spin dans une autre direction sur le 2^e photon donne accès à une information sur le premier photon.

Le fonctionnement d'un ordinateur quantique est basé sur les propriétés de superposition des états et d'intrication quantique de systèmes quantiques à deux niveaux d'énergie. Ces systèmes quantiques qui sont appelés qubits représentent l'information et permettent de la traiter. Ils peuvent être physiquement réalisés par des atomes neutres, des ions ou des électrons piégés, des centres colorés, des spins électroniques, des boucles supraconductrices, des atomes à états de Rydberg circulaires, des atomes froids manipulés par laser, etc.

Les états superposés des qubits sont préparés par les portes quantiques en couplant les qubits selon leur mode d'implantation avec des champs électromagnétiques d'amplitudes, de durées et de phases adaptées ou des faisceaux laser, ou des ondes radiofréquences, etc. On obtient des qubits dont les états sont intriqués en les faisant interagir (interférences quantiques). Les techniques utilisées pour faire interagir les qubits sont elles aussi très variées : on trouve la spectroscopie laser, l'interaction spin-photon, les techniques de RMN.

Les propriétés de superposition des états et d'intrication sont nécessaires à la réalisation des algorithmes quantiques ; en pratique dans un ordinateur quantique, elles demandent de s'affranchir du phénomène de décohérence [DAH 16, chapitre 6]. Ce phénomène est dû au couplage entre les systèmes quantiques et leur environnement. Comme il détruit très vite les relations de phase entre les états quantiques, le temps de décohérence doit être bien supérieur à la durée totale des calculs d'un algorithme quantique. Cela demande d'optimiser le temps de décohérence pour chaque technologie de qubit. Toutefois, les techniques de mesure qui ont été développées pour filtrer les effets des perturbations du milieu environnant sur les états de spins magnétiques en résonance magnétique nucléaire [VAN 04] peuvent être appliquées à des qubits basés sur d'autres principes physiques pour préparer les états des qubits, les caractériser et réduire le taux d'erreur.

Les nombreuses applications des ordinateurs quantiques sont la cryptologie (analyse de chiffrement et détection d'intrusions dans les échanges) et les recherches dans les très grandes bases de données.