

Powering Sensors by Harvesting Energy from Ionizing Radiation: A Feasibility Analysis

A PhD thesis by Ir. Alexandre Quenon

Abstract (EN)

Nuclear technologies, based on radioactive materials, are numerous and part of our daily lives. Among them, the production of electrical energy, together with nuclear medicine (from imaging to cancer treatment), can be mentioned. These applications have to be monitored throughout the whole process, from transportation to the actual usage. However, the monitoring should be done remotely, to prevent the workers from being exposed to ionizing radiation coming from the radioactive material. One of the existing solutions relies on wireless sensors, which can transmit the acquired data. Unfortunately, those sensors have to be powered, most of the time with an external battery, which will eventually have to be replaced.

This is the frame in which the present PhD thesis takes place, by suggesting harvesting the ambient energy and convert it into electrical energy. Specifically, this PhD thesis analyzes the possibility of harvesting the energy contained in ionizing radiation coming from the radioactive material in order to power the monitoring sensors. This research is focused on β and γ radiation harvesting, and aims to make the sensors completely autonomous, hence preventing any operator from being exposed to radiation hazard to replace a battery or collect data. The target application is the monitoring of the transportation of radioactive material for nuclear medicine.

The main contributions of the PhD thesis can be summarized as follows. The idea of converting directly ionizing radiation into electricity for energy harvesting applications is a new area of research opened by this work. The feasibility analysis required the development of an experimental setup dedicated to the measurement of the real-time, ultra-low current, electrical response of irradiated semiconductor devices, such as diodes. The experimental setup includes a Python package to control the instruments remotely, made open-source and released publicly on GitHub, as well as a 3D-printed device that enables a fine control of the distance and the angle between the radiation source and the irradiated sample. Both guarantee the repeatability of the experiments. The feasibility analysis demonstrated the existence of an ionization-induced current, in the picoampere range, harvested with a single photodiode (BPW34) with no external bias voltage. A preliminary integrated circuit design exploration has been carried out, which is the prerequisite for the manufacturing of a proof-of-concept chip.

Résumé (FR)

Les technologies nucléaires, basées sur des matériaux radioactifs, sont nombreuses et présentes dans notre vie quotidienne. On peut citer la production d'énergie électrique, mais aussi la médecine nucléaire, allant de l'imagerie au traitement de cancers. Ces applications doivent être surveillées à toutes les étapes de la chaîne, que ce soit pendant le transport des matériaux radioactifs ou durant leur utilisation. Toutefois, cette surveillance devrait se faire à distance, afin d'éviter d'exposer les opérateurs et opératrices au rayonnement ionisant issu des matériaux radioactifs. Une des solutions existantes de surveillance à distance est basée sur l'utilisation de capteurs sans fil, capables d'envoyer les données qu'ils récoltent. Malheureusement, ces capteurs doivent être alimentés en énergie, souvent à l'aide d'une batterie externe, qui doit tôt ou tard être remplacée.

C'est dans ce cadre que cette thèse de doctorat se positionne, en proposant de récolter l'énergie ambiante et de la convertir en énergie électrique. Plus spécifiquement, cette thèse étudie la possibilité de récolter l'énergie présente dans le rayonnement ionisant issu des matériaux radioactifs afin d'alimenter les capteurs qui les surveillent. Bien que cette étude se concentre sur la récolte du rayonnement β et γ , son but ultime est de rendre les capteurs complètement autonomes, ne nécessitant ainsi plus d'exposer un ou une opératrice au rayonnement pour remplacer une batterie ou collecter des données. La principale application visée est la surveillance du transport des matériaux radioactifs destinés à la médecine nucléaire.

Les contributions scientifiques majeures de cette thèse de doctorat peuvent être résumées comme suit. L'idée de procéder à une conversion directe du rayonnement ionisant en électricité pour des applications de récolte d'énergie est un nouveau champ de recherche ouvert par ce travail. L'analyse de faisabilité a nécessité le développement d'un dispositif expérimental dédié aux mesures en temps-réel, à très faible courant, de la réponse électrique de composants à semiconducteurs soumis aux radiations, tels que des diodes. Le dispositif expérimental comporte un paquet Python pour le contrôle à distance des instruments, publié en open-source sur GitHub, ainsi qu'un élément imprimé en 3D permettant de contrôler finement l'angle et la distance entre la source de rayonnement et l'échantillon irradié. Ces deux composantes garantissent la répétabilité des expériences. L'analyse de faisabilité a démontré l'existence d'un courant d'ionisation induit, de l'ordre du picoampère, récolté par une unique photodiode (BPW34) sans tension de polarisation externe. Une étude préliminaire a permis d'explorer la conception d'un circuit intégré, qui résultera en la fabrication d'une puce pour valider le concept.