

**Developing an Electron Multipacting-Free  
Cathode Unit of the Superconducting Radio  
Frequency Photoinjector**

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

**vorgelegt von**

Eden Tafa Tulu  
geb. am 02.11.1983 in Guder  
aus Äthiopien

Rostock,

May 2020

# Abstract

Future light sources such as synchrotron radiation sources driven by an Energy Recovery Linac, Free Electron Lasers or THz radiation sources have in common that they require injectors, which provide high-brilliance, high-current electron beams in almost continuous operation. Thus, the development of appropriate highly brilliant electron sources is of key importance. With its superconducting radio frequency photoinjector (SRF gun) the Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf provided a promising approach for this key component, which has since been adopted in other laboratories. However, some limitations occur caused by electron multipacting in the cathode vicinity, which prevent the SRF gun from maximum productivity. The aim of this thesis is to deepen the understanding of multipacting and to obtain potential multipacting suppression techniques through detailed numerical investigations, and simple analytical analysis in the critical area of the SRF gun. Most importantly, the investigation is focused on developing a new (or an improved) design of the photocathode channel, which is an essential component for developing an MP-free SRF gun. Therefore, several possible remedies to suppress electron multipactor discharge and to improve the breakdown threshold in the vicinity of the photocathode of the SRF gun are investigated. Introducing cylindrically symmetric rectangular grooves and cylindrically symmetric isosceles grooves on the cathode surface of the SRF gun proved to be an efficient way to totally avoid vacuum electron multipacting. Moreover, a systematic multi-objective optimization based on a *trust-region algorithm* is performed to obtain optimal geometric parameters for these newly designed cathode stems. In a final step, the robustness of the optimized models is examined through uncertainty quantification and global sensitivity analysis. For this purpose, this work employs advanced tools, i.e. the generalized polynomial chaos expansion, and the generalized polynomial chaos based Sobol sensitivity indices. In conclusion, the development of this MP-free cathode unit serves particularly the further development at ELBE and thus the increase of the performance of existing and future compact accelerators. Nonetheless, the concrete and methodological results obtained here are of high value for similar national projects as well; for instance, for the development of an SRF photoinjector for bERlinePro at Helmholtz Zentrum Berlin. There is also significant international interest in using an SRF gun with comparable cathode unit with efforts to simplify the design as well as the negative influence of adsorbates as a result of cathode coating and the operation at cryogenic temperatures.

# Zusammenfassung

Zukünftige Lichtquellen wie Synchrotronstrahlungsquellen, die von einem Energy-Recovery-Linac (ERL), freien Elektronenlasern oder THz-Strahlungsquellen angetrieben werden, haben gemeinsam, dass sie Injektoren benötigen, die hochbrillante Hochstromelektronenstrahlen in nahezu kontinuierlichem Betrieb bereitstellen. Daher ist die Entwicklung geeigneter hochbrillanter Elektronenquellen von zentraler Bedeutung. Das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf hat mit seinem supraleitenden Hochfrequenz-Photoinjektor (SRF-Gun) einen vielversprechenden Ansatz für diese Schlüsselkomponente geschaffen, die inzwischen auch in anderen Laboren Anwendung gefunden hat. Nichtsdestotrotz treten einige Einschränkungen auf, die durch Elektronenvervielfachung verursacht werden, und unterdrückt werden sollten, um die SRF-Gun weiter zu verbessern.

In diesem Projekt wurde eine detaillierte Analyse des Multipacting im kritischen Bereich der SRF-Gun durchgeführt und verschiedene Unterdrückungstechniken für das Multipacting untersucht. Die analytischen Vorhersagen über den Schwellwert für das Multipacting sind qualitativ vergleichbar mit numerischen Simulationsergebnissen und experimentellen Daten. Mehrere mögliche Maßnahmen zur Unterdrückung der Elektronen-Multipaktor-Entladung und zur Verbesserung des Schwellwertes in der Nähe der Photokathode des SRF-Guns wurden untersucht. Die Einführung von rechteckigen und dreieckigen Rillen auf der Kathodenoberfläche erwies sich als eine effiziente Möglichkeit zur Unterdrückung von Vakuum-Elektronen-Multipacting.

Die Parameter für die rechteckig und dreieckig gerillten Oberflächen wurden in Bezug auf die Anzahl der Teilchen sowie auf die mittlere Sekundäremissionsausbeute optimiert ( $\delta_a$ ). Zu Beginn haben wir die Geometrieparameter der Rillen manuell in Bezug auf die Anzahl der Partikel im Laufe der Zeit variiert. Basierend auf diesen Ergebnissen konnten wir Geometrieparameter mit starken Auswirkungen auf das MP identifizieren. Diese Parameter wurden dann mit dem sogenannten trust-region-Algorithmus weiter optimiert. Dieser Algorithmus bietet die global beste Lösung für unsere Modelle. Im Gegensatz zur manuellen Optimierung wurde dies im Hinblick auf die besser geeignete, d.h. niedrigere Sekundäremissionsausbeute ( $\delta_a$ ) durchgeführt. Die Anfangsparameter wurden basierend auf den manuellen Ergebnissen ausgewählt. Die Optimierungsziel Funktion erfordert, dass der SEYa kleiner als der Multipacting-Schwellenwert ist ( $\delta_a < 1$ ).

Die numerischen Untersuchungen zur stochastischen Abhängigkeit der sekundären Emissionskoeffizienten in einem neu konstruierten Photokathodenkanal der SRF-Gun wurden dann untersucht. Der SEY-Wert wird durch Oberflächenkontamination bee-

---

influsst, daher steigt dieser Wert oft während des Betriebs der SRF-Gun an. Daher war es erstrebenswert, auch eine globale Sensitivitätsanalyse durchzuführen, um so zu bestimmen, wie sich im gewählten Modell die Variabilität des Sekundärelektron-Emissionskoeffizienten auf den SEYa auswirkt sowie den Arbeitsbereich der gerillten Strukturen in Abhängigkeit vom multipacting-Schwellwert ( $\delta_a < 1$ ) zu bestimmen. Aus diesem Grund wurden die verallgemeinerte, polynomiale Chaos-basierte Quantifizierung von Unsicherheiten und das Sobol-Indexverfahren verwendet, um die Sensitivität in den Modellergebnissen zu bestimmen.