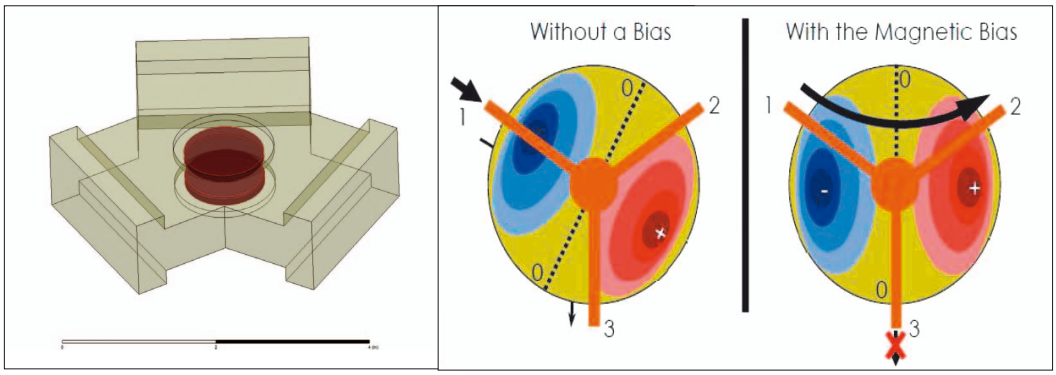
Beschleunigersysteme

Wellenleiter-Dreiport-Übergang und Viertor-Differential-Phasenverschiebungs-Zirkulator

Hier wird die Performance zweier Schlüsselkomponenten in supraleitenden Beschleuniger-applikationen besprochen und verglichen.



Elektronenbeschleuniger sind auch in der Industrie ständig wichtiger geworden, denn mit ihnen lassen sich neuartige Produktionsprozesse realisieren (z.B. in Kunststoffverarbeitung, Lebensmittelbestrahlung oder Medizin). Praktisch sind dabei Table-Top-Elektronenbeschleunige, deren Grundlage die Superconducting Radio Frequency Gun ist, eine neuartige Fotoelektronenquelle. Die technische Herausforderung für einen industriell anwendbaren Bestrahlungsapparat ist der Betrieb einer normalleitenden Fotokathode in einem supraleitenden Beschleunigungsresonator.

Grundlagen

Hochleistungsferrite sind für den Betrieb von Beschleunigersystemen von entscheidender Bedeutung, um die High-Power Amplifiers (HPAs) vor reflektierter Leistung zu schützen und auch einen passenden Lastzustand für den HPA aufrechtzuerhalten, um einen effizienten und stabilen Betrieb zu gewährleisten.

Zu diesem Zweck können zwei Bauelemente eingesetzt werden, der Dreitor-Junction-Zirkulator oder der Viertor-Differential-Phasenverschiebungs-Zirkulator. Diese Bauelemente unterscheiden sich erheblich in ihrer Betriebsweise und weisen für den Konstrukteur des Beschleunigers unterschiedliche Eigenschaften auf.

Zunächst einmal ist es wichtig, zu erkennen, dass traditionelle Beschleuniger und supraleitende Beschleuniger unterschiedliche Anforderungen an Zirkularen stellen. In einem NCRF (Normally Conducting RF Cavity) werden die Resonanzhohlräume aus hochreinem Kupfer hergestellt, und obwohl dieses Material ein sehr guter Leiter ist, weisen bei HF-Frequenzen alle Metalle eine endliche Leitfähigkeit auf, und ein großer Teil der zugeführten HF-Energie geht als Wärme an den Wände des Hohlraums verloren. So wird im Betrieb eine relativ geringe HF-Energie vom Hohlraum zurück zum Schutz-Zirkulator reflektiert.

In einer SCRF (Superconducting RF Cavity) müssen die verwendeten Materialien bei sehr niedrigen Temperaturen betrieben werden, typischerweise um die 4 K. Dies wird durch die Verwendung großer Mengen von flüssigem Helium in komplexen Kühlstrukturen erreicht, die kompletten Baugruppen werden üblicherweise als Kryomodule bezeichnet. Die supraleitenden Materialien weisen immer noch eine endliche Leitfähigkeit auf, aber die Werte sind

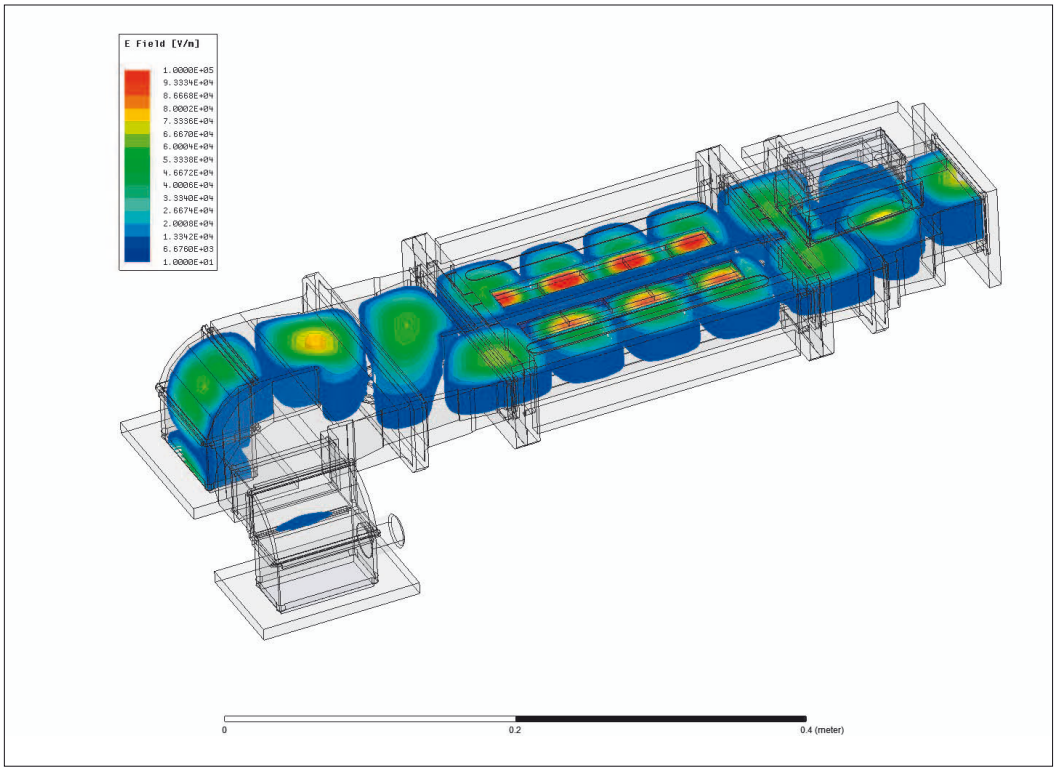


Bild 1: Viertor-Differential-Phasenverschiebungs-Zirkulator

Ferrite Microwave Technologies
https://ferriteinc.com

GLOBES ELEKTRONIK GmbH & Co KG
hf-welt@globes.de
www.globes.de

5…6 Größenordnungen niedriger als die von NCRF-Systemen. Die Verlustleistung in der Kavität ist so stark reduziert, und ein großer Teil der zugeführten HF-Energie wird während des Betriebs ständig von der Kavität reflektiert; in bestimmten Betriebsbedingungen kann es fast zur vollständigen Reflexion kommen. Dadurch wird die Performance des in diesen Systemen eingesetzten Zirkulators wesentlich stärker beansprucht.

Der Dreiport-Junction-Zirkulator

hat eine symmetrische Struktur, bei der Ferritscheiben geeigneter Größe am Kreuzungspunkt von drei Wellenleitern platziert werden, s. Aufmachergrafik. Ein magnetisches Vorspannungsfeld wird mittels Permanentmagneten außerhalb des Kreuzungspunkts an diese Ferritscheiben angelegt. Die Wahl des Ferritmaterials und die Abmessungen sind dabei entscheidend, um den gewünschten Betriebszustand zu erreichen. Innerhalb der Ferritplatten wird ein Stehwellenmuster aufgebaut, bei dem das angelegte Vorspannungsfeld das Feldmuster dreht, um so den dritten Anschluss effektiv zu entkoppeln. Es bildet sich so ein verlustarmer Übertragungsweg von Anschluss 1 zu Anschluss 2.

Beim Junction-Zirkulator hängt die optimale Performance von der Aufrechterhaltung der Symmetrie ab; ein Beitrag von J. Helszjan hat gezeigt, dass bei unterschiedlicher Phase eines Kurzschlusses am Ausgangsport maximal die dreifache nominale Einfügungsdämpfung auftreten kann („Stehwellenlösung eines 3-Tor-Junctionzirkulators mit einem Anschluss, der mit einem variablen Kurzschluss abgeschlossen ist“, Mikrowellen, Optik und Akustik, IEE Journal Vol. 3, No. 2, pp. 67-68, März 1979). Die erhöhte Dämpfung führt zu einer erhöhten Erwärmung des Ferritmaterials, wodurch dessen Magnetisierungssättigung verringert und somit die Betriebsfrequenz angehoben wird. Dies kann durch Anpassung des Vorspannungsfeldes kompensiert werden, jedoch ist aufgrund der erforderlichen Geschwindigkeit und der thermischen Konstante des Bauelements die Abstimmungskompensation typischerweise unzureichend.

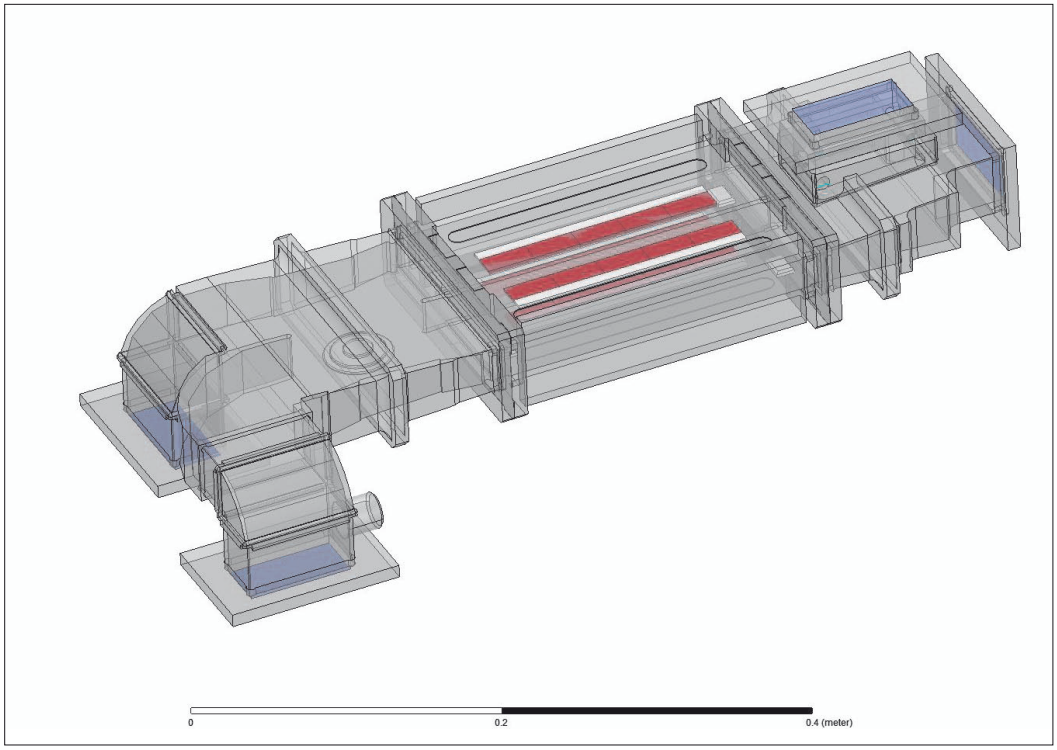


Bild 2: Hinzufügung eines Magic T und eines Kurzschlitz-Hybrids

Der maximale physikalische Durchmesser des hier verwendeten Ferrits wird direkt von der Betriebsfrequenz bestimmt. Genauer gesagt, ist der Ferrit auf die Größe beschränkt, in der sich der dominante Mode ausbreiten kann und Modi höherer Ordnung unterdrückt werden. Da die Leistungsaufnahme durch die Wärme beschränkt ist, die aus dem Ferritmaterial abgeführt werden kann, um den korrekten Betrieb aufrechtzuerhalten, stellt diese Eigenschaft des Zirkulators eine Grenze für die Leistungsaufnahme dar.

Der Viertor-Differential-Phasenverschiebungs-Zirkulator

benötigt im Gegensatz zum Dreitor-Junction-Zirkulator nicht das Stehwellenmuster wie in einem Ferritresonator. Bild 1 zeigt seine Struktur. Um einen Übertragungspfad zu schaffen, nutzt er die reziproke Phasencharakteristik von einem magnetisierten Ferrit, der an einer Stelle mit zirkularer Polarisation in einem Wellenleiter platziert ist. Dort, wo einem HF-Signal je nach der Richtung, in der es das Ferritmaterial durchläuft, eine unterschiedliche Ausbreitungskonstante präsentiert wird.

Wenn die differentielle Phase im Zentrum auf 90° eingestellt ist, schafft man einen Zirkulator durch Hinzufügung eines Magic T und eines Kurzschlitz-Hybrids (Bild 2).

Der Betrieb hängt nur von der korrekten differentiellen Phasenverschiebung ab, und diese ist wiederrum vom erforderlichen Gesamtvolumen an Ferriten abhängig. Es liegt im Ermessen des Entwicklers, wie dies erreicht wird. Beispielsweise kann ein längerer Mittenabschnitt mit dünnerem Ferritmaterial verwendet werden, wodurch die Oberfläche zur Ableitung der absorbierten Leistung vergrößert wird, dies ist beim Junction-Zirkulator nicht möglich. Der Vierport-Zirkulator leidet daher nicht unter Abmessungsbeschränkungen. Es gibt die von FMT eingeführte Technik mit einer verteilten Mittenteilstruktur; damit erreicht man sehr hohe Spitzen- als auch eine mittlere Belastbarkeit.

Schlussbemerkung

In SCRF-Kavitäten gibt es zusätzliche Leistungsanforderungen an die Ferritbauteile. Die Notwendigkeit, plötzliche Änderungen der angelegten Leistungspegel in einem Betriebszustand zu bewältigen, in dem fast die gesamte Leistung reflektiert wird, stellt eine ungewöhnlich hohe Belastung für den Zirkulator dar. Der Dreitor-Sperrschicht-Zirkulator kann in diesen Situationen eingesetzt werden, muss jedoch durch exotische Kompensations-(Abstimmungs-)Netzwerke unterstützt werden, die teuer sind und unter thermischer „Verzögerung“ leiden. Die Verwendung eines Viertor-Zirkulators ist da vorzuziehen wegen seiner relativen Unempfindlichkeit gegen den konstant hohen reflektierten Leistungspegeln in einer SCRF-Installation und seiner Fähigkeit, diese Reflexionen ohne externe Kompensation zu bewältigen. ◄