

高频瓷的 电气物理基础

Н. П. 鮑高罗齐茨基 И. Д. 弗利德別尔克著



國防工業出版社

73.17

813

52

高频瓷的电气物理基础

Н. П. 鲍高罗齐茨基 И. Д. 弗利德别尔克著

戴富英 刘宁馨译

3/090/09



国防工业出版社

51.964

內 容 簡 介

本书闡述了适用于新型高频材料——无綫电陶瓷的半导体和电介质物理問題。同时还叙述了决定瓷料形成和高频瓷在电场作用下的現象的物理-化学过程。

本书以相当大的注意力来闡述无綫电陶瓷生产工艺过程各工序的基本原理。书中列举了許多实际資料来說明最新陶瓷材料和零件的性能。

本书讀者对象是从事无綫电零件制造的工程技术人员和研究工作者，但对于本专业的高等工业学校大学生亦有参考价值。

苏联 Н. П. Богородицкий, И. Д. Фридберг 著 ‘Электрофизические основы высокочастотной керамики’ (Госэнергоиздат 1958 年第一版)

*

*

*

國防·重工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

*

787×1092 $\frac{1}{27}$ 印張 $\frac{71}{27}$ 146 千字

1961 年 5 月第一版

1961 年 5 月 第一次印刷

印数: 0,001— 9,000 册 定价: (11-8)1.15 元

NO 3394

序

本书是1948年出版的作者所著〔高频无机电介质〕（Высокочастотные неорганические диэлектрики）一书的发展。十年来，高频无机材料获得了广泛的发展。在这个时期内，苏联建立起了无线电陶瓷工业，它包括绝缘瓷、半导体瓷和磁性瓷等各种陶瓷材料。同时在这个领域内进行了实验和理论研究，现在已经能够把这些生产经验和科学研究的资料总结起来。

作者写这本书的任务是针对高频材料的新领域——无线电陶瓷的发展，阐明电介质和半导体物理的若干问题。本书特别重视阐述无线电陶瓷制品生产工艺的基本原则，并列出了生产中所出产的无线电陶瓷材料和零件的性能的实际资料。

当然，对从事无线电陶瓷生产或使用的工作人员所关心的所有问题，本书不能一一阐述。在论述理论问题时，避免了许多数学论证，以便广大读者易于阅读。在书中所谈的许多问题上，作者都发挥了自己的观点。

可以相信，由于本书尽可能地收集了有关高频瓷物理和工艺原则的新资料，它将使读者有所收益。

作者对和自己一起工作多年的同事们表示深切的谢意，感谢他们的建议和意见。作者还向波诺马列夫（Ф. Т. Пономарев）、盖利斯（Е. А. Гайлиш）和茹可夫斯基（В. И. Жуковский）表示衷心的谢忱。

作 者

緒 論

物理和工程中的高頻瓷

目前陶瓷工艺对于用各种材料（电介质、半导体、磁性材料和金屬等）制造产品方面，均具有极其重大的意义。这种工艺所使用的材料在性能和成分上可以无限多样，同时零件的成型方法都很类似。对于所有陶瓷材料，其共同的主要工序是物料在低于其熔点的溫度下进行燒結的过程，这与玻璃的工艺不同，熔化是不容許的。近几十年来，广泛地发展了某些陶瓷部門，如純氧化物陶瓷、金屬陶瓷（粉末冶金）和以碳化物、氮化物、硼化物和硅化物为基础的陶瓷。

电工陶瓷是广泛的陶瓷工艺部門之一。它包括各种电工材料：电絕緣材料、半导体材料和磁性材料，其共同的化学鍵是离子晶格結構。

电工陶瓷之分为三类不是根据极化和載流子的物理本性。分类的标志是材料的技术特性，首先是电导率的大小。許多电性能良好的絕緣瓷具有电子电导。按此物理特征，这些材料似应归于半导体。但是在研究絕緣瓷和半导体瓷的性能时，考虑到其中所发生的物理过程往往相同，因而不能將它們截然分开。

下表列出了电工陶瓷的主要类型。本书只討論絕緣瓷的成分和性能，且并不尽述这一大类的所有材料，而仅討論高頻瓷（无綫电陶瓷）。

高頻技术和其他技术領域一样，其基础是和材料及制成零件的結構有关的物理現象。只要深入研究材料中发生的物理过程便

电工陶瓷的主要类型

种类	陶瓷材料按用途的分类	特 性	陶瓷材料的名称
絕 緣 瓷	装置制品和小容量电容器用的陶瓷 电容器瓷, 用作: 1. 高频回路电容器, 包括热补偿和隔流电容器 2. 高频热稳定电容器 3. 低频电容器 多孔瓷, 用作: 1. 电子管的絕緣件 2. 繞繞电阻基体 续电瓷和压电瓷, 用作: 1. 低频电容器 2. 压电元件 3. 非綫性元件	介电系数不大 ($\epsilon < 10$) 1. ϵ 值高, $TK\epsilon$ 为負值 2. $TK\epsilon$ 值小 3. 介电系数很高 在高温下絕緣 1. $tg \delta$ 小 2. 耐热性高 有电滯特性 1. 介电系数特高 2. 压电模数高 3. 介电系数随电场强度剧烈变化	皂石瓷, 超高频瓷, 銀长石瓷, 剛玉-莫来石瓷, 高频瓷 1. 金紅石瓷 (鈦康 T-80)、鈣鈦矿瓷 (T-150) 2. 鈦鋯瓷 (T-40, T-20)、錫酸鹽瓷 (C-15) 3. 鈦酸鋁-鋁 1. 多孔剛玉瓷, 多孔皂石瓷 2. 燒粉耐火瓷, 剛鋁石, 堇青石瓷 1. CM-1, T-7500 2. T-1700 3. 可变康 $\left\{ \begin{array}{l} \text{鈦酸盐、鋯酸} \\ \text{盐和錫酸盐的} \\ \text{固溶体} \end{array} \right.$
半 导 体 瓷	半导体瓷, 用作: 1. 大功率无綫电电阻、波导負載、高温加热器 2. 非綫性元件 3. 热敏电阻	电子电导高 1. 电阻随温度和电压的变化小 2. 电阻随电压剧烈变化 3. 电阻随温度剧烈变化	1. 以碳化硅为基础的陶瓷和含石墨的陶瓷 (硅利 Силит, 开拉克斯, Керакс) 2. 以碳化硅为基础的陶瓷 (維利 Вилит, НПС) 3. 以銅錳和鈷錳反尖晶石为基础的陶瓷
磁 性 瓷	磁性瓷: 1. 軟磁性瓷 2. 恒磁性瓷	导磁率高而电阻大 1. 矯頑力小 2. 矯頑力大	1. 鎳鋅, 鎳鋅, 鎳和其他鉄氧体 2. 鎳鉄氧体

① $TK\epsilon$ ——介电系数的温度系数。——譯者

可确定着零件的大部分特性。这里包括电性能——电容器或线圈的品质因数、比电容、电容或电感温度系数、绝缘电阻和容许工作电压。零件的机械特性也在极大程度上取决于材料的性能。

在研究材料的同时，对零件的结构，特别对它的形状也应予以重视。

无线电陶瓷是现代无线电电机中使用的最优良的结构材料之一。在许多情况下，无线电电机的技术水平就是以其使用陶瓷绝缘的程度来衡量的。

若在成分上进行适当的选择，无线电陶瓷可以具备各种不同的性能——低的或很高的介电系数，正的、负的或接近于零的 $TK\epsilon$ 值，高的机械强度等等。

无线电陶瓷在温度、湿度和许多化学活跃物质的长期作用下，能保持高度的稳定。与塑料和其他电绝缘材料相反，它通常不老化和没有残余变形。

用软焊料或硬焊料焊接，可以使无线电陶瓷与金属牢固接触。无线电陶瓷的工艺适于零件成批制造。

无线电陶瓷材料的成分与电瓷或日用瓷有着本质的差别。如果说普通瓷的主要成分是粘土、高岭土、长石、石英，则制造无线电陶瓷的主要成分是金属氧化物——铝、钛、锡、锆等的氧化物。

在绝缘子瓷制品的生产中所采用的成型方法，包括毛坯的机械加工法，对于制造尺寸精确和形状复杂的无线电元件来说是完全不够的。这时必须使用精密的金属加工机床，必须严格地考虑收缩系数数值的变化，必须广泛地使用干压法和其他新的制品成型方法。

高频陶瓷材料的创制不久以前主要还是建立在试验研究的基础上的。已经积累起来的理论知识已能够确定某些规律，目前即根据这些规律对瓷料进行研究。不过，除了要不断地提高陶瓷的电气指标之外，还应当以更大的精力来研究材料的工艺特点和生产的经济性。

目 录

序.....	4
緒論 物理和工程中的高频瓷.....	5
第一篇 无机电介质中的物理过程.....	8
§1 无机电介质中的电荷.....	8
§2 极化过程.....	24
§3 无綫电陶瓷的电导.....	58
§4 无綫电陶瓷在电场中的破坏.....	70
§5 陶瓷絕緣子的表面放电.....	90
§6 无綫电陶瓷的机械强度.....	97
第二篇 高频瓷的成分和工艺特点.....	105
§1 根据其要求性能对无綫电陶瓷的成分和工艺的选择.....	105
§2 $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系統的材料.....	123
§3 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系統的材料.....	132
§4 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 和 $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系統的材料.....	138
§5 以鈦、鋯和錫的化合物为基础的材料.....	139
§6 无綫电陶瓷的分类.....	157
§7 設計陶瓷零件的原則.....	161
§8 制造无綫电陶瓷零件的工艺过程.....	180
参考文献.....	186

73.17

813

52

高频瓷的电气物理基础

Н. П. 鲍高罗齐茨基 И. Д. 弗利德别尔克著

戴富英 刘宁馨译

3/090/09



国防工业出版社

1964

內 容 簡 介

本书闡述了适用于新型高频材料——无綫电陶瓷的半导体和电介质物理問題。同时还叙述了决定瓷料形成和高頻瓷在电場作用下的現象的物理-化学过程。

本书以相当大的注意力来闡述无綫电陶瓷生产工艺过程各工序的基本原理。书中列举了許多实际資料来說明最新陶瓷材料和零件的性能。

本书讀者对象是从事无綫电零件制造的工程技术人员和研究工作者，但对于本专业的高等工业学校大学生亦有参考价值。

苏联 Н. П. Богородицкий, И. Д. Фридберг 著 ‘Электрофизические основы высокочастотной керамики’ (Госэнергоиздат 1958 年第一版)

* * *

國防·重工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

*

787×1092 $\frac{1}{27}$ 印張 $7\frac{1}{27}$ 146 千字

1961 年 5 月第一版

1961 年 5 月 第一次印刷

印数: 0,001— 9,000 册 定价: (11-8)1.15 元

NO 3394

目 录

序.....	4
緒論 物理和工程中的高频瓷.....	5
第一篇 无机电介质中的物理过程.....	8
§1 无机电介质中的电荷.....	8
§2 极化过程.....	24
§3 无綫电陶瓷的电导.....	58
§4 无綫电陶瓷在电场中的破坏.....	70
§5 陶瓷絕緣子的表面放电.....	90
§6 无綫电陶瓷的机械强度.....	97
第二篇 高频瓷的成分和工艺特点.....	105
§1 根据其要求性能对无綫电陶瓷的成分和工艺的选择.....	105
§2 $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系統的材料.....	123
§3 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系統的材料.....	132
§4 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 和 $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系統的材料.....	138
§5 以鈦、鋳和錫的化合物为基础的材料.....	139
§6 无綫电陶瓷的分类.....	157
§7 設計陶瓷零件的原則.....	161
§8 制造无綫电陶瓷零件的工艺过程.....	180
参考文献.....	186

04689

序

本书是1948年出版的作者所著〔高频无机电介质〕（Высокочастотные неорганические диэлектрики）一书的发展。十年来，高频无机材料获得了广泛的发展。在这个时期内，苏联建立起了无线电陶瓷工业，它包括绝缘瓷、半导体瓷和磁性瓷等各种陶瓷材料。同时在这个领域内进行了实验和理论研究，现在已经能够把这些生产经验和科学研究的资料总结起来。

作者写这本书的任务是针对高频材料的新领域——无线电陶瓷的发展，阐明电介质和半导体物理的若干问题。本书特别重视阐述无线电陶瓷制品生产工艺的基本原则，并列出了生产中所出产的无线电陶瓷材料和零件的性能的实际资料。

当然，对从事无线电陶瓷生产或使用的工作人员所关心的所有问题，本书不能一一阐述。在论述理论问题时，避免了许多数学论证，以便广大读者易于阅读。在书中所谈的许多问题上，作者都发挥了自己的观点。

可以相信，由于本书尽可能地收集了有关高频瓷物理和工艺原则的新资料，它将使读者有所收益。

作者对和自己一起工作多年的同事们表示深切的谢意，感谢他们的建议和意见。作者还向波诺马列夫（Ф. Т. Пономарев）、盖利斯（Е. А. Гайлиш）和茹可夫斯基（В. И. Жуковский）表示衷心的谢忱。

作 者

緒 論

物理和工程中的高頻瓷

目前陶瓷工艺对于用各种材料（电介质、半导体、磁性材料和金屬等）制造产品方面，均具有极其重大的意义。这种工艺所使用的材料在性能和成分上可以无限多样，同时零件的成型方法都很类似。对于所有陶瓷材料，其共同的主要工序是物料在低于其熔点的溫度下进行燒結的过程，这与玻璃的工艺不同，熔化是不容許的。近几十年来，广泛地发展了某些陶瓷部門，如純氧化物陶瓷、金屬陶瓷（粉末冶金）和以碳化物、氮化物、硼化物和硅化物为基础的陶瓷。

电工陶瓷是广泛的陶瓷工艺部門之一。它包括各种电工材料：电絕緣材料、半导体材料和磁性材料，其共同的化学鍵是离子晶格結構。

电工陶瓷之分为三类不是根据极化和載流子的物理本性。分类的标志是材料的技术特性，首先是电导率的大小。許多电性能良好的絕緣瓷具有电子电导。按此物理特征，这些材料似应归于半导体。但是在研究絕緣瓷和半导体瓷的性能时，考虑到其中所发生的物理过程往往相同，因而不能將它們截然分开。

下表列出了电工陶瓷的主要类型。本书只討論絕緣瓷的成分和性能，且并不尽述这一大类的所有材料，而仅討論高頻瓷（无綫电陶瓷）。

高頻技术和其他技术領域一样，其基础是和材料及制成零件的結構有关的物理現象。只要深入研究材料中发生的物理过程便

电工陶瓷的主要类型

种类	陶瓷材料按用途的分类	特 性	陶瓷材料的名称
絕 緣 瓷	装置制品和小容量电容器用的陶瓷 电容器瓷, 用作: 1. 高频回路电容器, 包括热补偿和隔流电容器 2. 高频热稳定电容器 3. 低频电容器 多孔瓷, 用作: 1. 电子管的絕緣件 2. 繞繞电阻基体 续电瓷和压电瓷, 用作: 1. 低频电容器 2. 压电元件 3. 非綫性元件	介电系数不大 ($\epsilon < 10$) 1. ϵ 值高, $TK\epsilon$ 为負值 2. $TK\epsilon$ 值小 3. 介电系数很高 在高温下絕緣 1. $tg \delta$ 小 2. 耐热性高 有电滯特性 1. 介电系数特高 2. 压电模数高 3. 介电系数随电场强度剧烈变化	皂石瓷, 超高频瓷, 鉍长石瓷, 剛玉-莫来石瓷, 高频瓷 1. 金紅石瓷 (鈦康 T-80)、鈣鈦矿瓷 (T-150) 2. 鈦鋯瓷 (T-40, T-20)、錫酸鹽瓷 (C-15) 3. 鈦酸鋇-鈹 1. 多孔剛玉瓷, 多孔皂石瓷 2. 燒粉耐火瓷, 剛鋁石, 堇青石瓷 1. CM-1, T-7500 2. T-1700 3. 可变康 $\left\{ \begin{array}{l} \text{鈦酸盐、鋯酸} \\ \text{盐和錫酸盐的} \\ \text{固溶体} \end{array} \right.$
半 导 体 瓷	半导体瓷, 用作: 1. 大功率无綫电电阻、波导負載、高温加热器 2. 非綫性元件 3. 热敏电阻	电子电导高 1. 电阻随温度和电压的变化小 2. 电阻随电压剧烈变化 3. 电阻随温度剧烈变化	1. 以碳化硅为基础的陶瓷和含石墨的陶瓷 (硅利 Силит, 开拉克斯, Керакс) 2. 以碳化硅为基础的陶瓷 (維利 Вилит, НПС) 3. 以銅錳和鈷錳反尖晶石为基础的陶瓷
磁 性 瓷	磁性瓷: 1. 軟磁性瓷 2. 恒磁性瓷	导磁率高而电阻大 1. 矯頑力小 2. 矯頑力大	1. 鎳鋅, 鎳鋅, 鎳和其他鉄氧体 2. 鎳鉄氧体

① $TK\epsilon$ ——介电系数的温度系数。——譯者

可确定着零件的大部分特性。这里包括电性能——电容器或线圈的品质因数、比电容、电容或电感温度系数、绝缘电阻和容许工作电压。零件的机械特性也在极大程度上取决于材料的性能。

在研究材料的同时，对零件的结构，特别对它的形状也应予以重视。

无线电陶瓷是现代无线电电机中使用的最优良的结构材料之一。在许多情况下，无线电电机的技术水平就是以其使用陶瓷绝缘的程度来衡量的。

若在成分上进行适当的選擇，无线电陶瓷可以具备各种不同的性能——低的或很高的介电系数，正的、負的或接近于零的 $TK\epsilon$ 值，高的机械强度等等。

无线电陶瓷在温度、湿度和许多化学活跃物质的长期作用下，能保持高度的稳定。与塑料和其他电绝缘材料相反，它通常不老化和没有残余变形。

用软焊料或硬焊料焊接，可以使无线电陶瓷与金属牢固接触。无线电陶瓷的工艺适于零件成批制造。

无线电陶瓷材料的成分与电瓷或日用瓷有着本质的差别。如果说普通瓷的主要成分是粘土、高岭土、长石、石英，则制造无线电陶瓷的主要成分是金属氧化物——铝、钛、锡、锆等的氧化物。

在绝缘子瓷制品的生产中所采用的成型方法，包括毛坯的机械加工法，对于制造尺寸精确和形状复杂的无线电元件来说是完全不够的。这时必须使用精密的金属加工机床，必须严格地考虑收缩系数数值的变化，必须广泛地使用干压法和其他新的制品成型方法。

高频陶瓷材料的创制不久以前主要还是建立在试验研究的基础上的。已经积累起来的理论知识已能够确定某些规律，目前即根据这些规律对瓷料进行研究。不过，除了要不断地提高陶瓷的电气指标之外，还应当以更大的精力来研究材料的工艺特点和生产的经济性。

第一篇 无机电介质中的物理过程

§1 无机电介质中的电荷

一切物质从电性能本质的观点来看，通常可分为金属、半导体和电介质。究竟属于那一类材料，应视其电子电导的大小及其与温度的关系特性而定。判断材料在电场中的性能的主要标准之一是物质电子的能带图。图1表示出了这样的图。

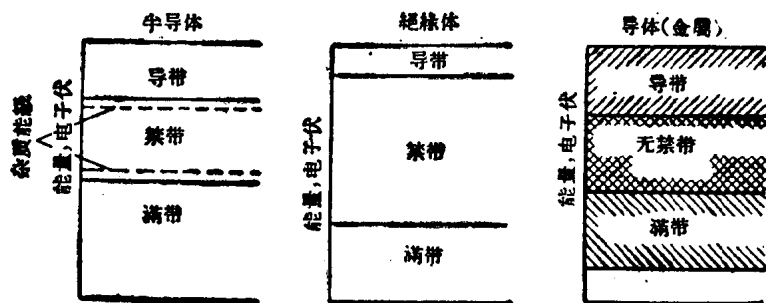


图1 金属、半导体和绝缘体电子的能带图[文献53]。

必须指出，在无机电介质中「半导体」和「电介质」的概念不仅决定材料的物理本性，而且还决定其工程用途。例如，某些含电子半导体成分的工程介质可能具有很小的电导率，能够有效地作绝缘体用。与此同时，也还知道有些电介质其禁带很宽，因而电子电导微小，但其离子电导却很大，因此它们在工程上当成离子半导体看待。

根据图1所示，可以作出结论说，只有在金属与电介质及金

屬与半导体之間，性质上才有原則差別。对于金屬，傳导电子的数量与原子数量大体相等，即为数很多，且不随溫度变化。这里沒有能隙，导带与滿带重叠，或滿带通常不完全填满。电介质和半导体的能带图仅以其禁带的宽度来区别。

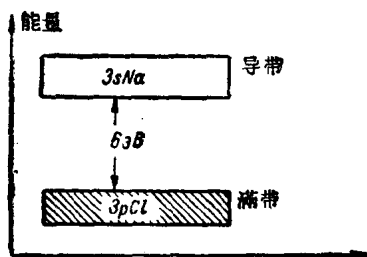


图2 NaCl晶体的上能带图
〔文献86〕。

在电介质和半导体之間沒有原則差別，是因为电介质在許多情况下具有电子电导，而平常它只有离子电导。可以举岩盐作这类电介质的例子，岩盐的能带图如图2所示。在一定的条件下，岩盐的晶体中存在显著的电子电导，这些条件是：晶格中含杂质（例如由于外来着色而滲入的杂质）、倫琴射綫或紫外綫輻射。

电导能带理論的基本原理是质点作有序排列，保証靜电场严格的周期性。这个理論完滿地解釋了晶体物质——金剛石、硅、鍺及許多金屬氧化物电性能的規律性。但电子电导也存在于某些簡單液体物质和无定形物质中，例如存在于碱金屬溶液——氨中，存在于无定形物质——硒和銻中。因此，电子电导不仅决定于长程序，即原子在大距离內排列有序的程度，而且还决定于短程序，即环繞該原子最邻近的原子的排列。这就是一切复杂有机物（高分子化合物）都不是电子半导体的原因。

当物质的物理本性还不清楚的时候，电工材料划分为金屬和电介质两大类。这样分类的着眼点是，在金屬中靜电场当电压取消后立即消失，而在电介质中却可以长期存在。現在，在积累了大量的实验資料之后，这样分类就不妥当了。电工材料应该按照导电状态的机构分类。按照載流子的本性，半导体与金屬相同，而按照导电状态的能量特征，它又与电解质相同。在金屬中，导电状态是正常的，未激发的；而在半导体和电解质中，导电状态