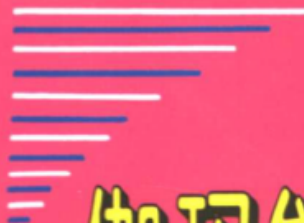


BGO

A series of horizontal lines of varying lengths, some blue and some white, arranged in a descending staircase pattern to the left of the main title.

伽玛能谱测量新技术

马丽娟 编著

295
J

地质出版社

A large triangular decorative element in the bottom right corner, composed of many thin, parallel lines in blue and white, creating a fan-like or sunburst effect.

THE NEW TECHNIQUE OF BGO-CRYSTAL BASED γ -RAY SPECTRUM MEASUREMENT

Ma Lijuan

Geological Publishing House
Beijing

ISBN 7-116-02451-4



9 787116 024519 >

ISBN 7-116-02451-4

P · 1825 定价: 10.00 元



BGO 伽玛能谱 测量新技术

马丽娟 编著

地质出版社

· 北 京 ·

内容简介

本书主要论述锗酸铋晶体(简称 BGO 晶体)及其在地质找矿中的应用。解决了 BGO 晶体能量分辨率低和温度系数大对 γ 能谱测量精度的影响,并把具有高探测效率的 BGO 晶体成功地应用于 γ 能谱测井、地面 γ 能谱测量、实验室 γ 能谱测量中;也为准确测量低本底的地面 γ 能谱测量开辟了道路,有效地解决了用 NaI (Tl) 晶体测 γ 能谱难以解决的问题。

图书在版编目(CIP)数据

BGO 伽玛能谱测量新技术/马丽娟编著. —北京:
地质出版社, 1997.9
ISBN 7-116-02451-4

I. B… II. 马… III. 锗酸铋晶体-应用- γ 能谱测量 IV.
P631.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 19935 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:徐才

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张: 3.75 字数: 99000

1997 年 9 月北京第一版·1997 年 9 月北京第一次印刷

印数: 1~500 册 定价: 10.00 元

ISBN 7-116-02451-4

P·1825

代 序

BGO 是锗酸铋 ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 晶体的缩写, 自 80 年代以来已较广泛地应用于核医学、高能物理学以及地学各领域中, 但一般仅限于 BGO 晶体与 NaI (Tl) 晶体之间性能的对比测试。例如用于在模型上测当量铀谱和钍谱, 以及总量 γ 测量等。近年来该技术在国际上也有不少进展。

作者自 80 年代中期以来, 在吸收国外已有的科学成果的基础上, 针对当时存在的一些影响该新技术向纵深发展的某些问题 (如分辨率低和温度系数大等), 进行了一系列有关基础理论和应用问题的深入研究 (如晶体的涂覆工艺技术和温度补偿技术等), 并取得了优异成果 (如分辨率已由 20% ~ 30% 提高到 10% 等)。为开发应用这一成果, 作者们首先从测井入手, 认真地分析了当时国内外 γ 总量测井仪和 γ 能谱测井仪中存在的问题, 如 NaI (Tl) 晶体灵敏度低和测量范围小等弱点 (而这些方面恰巧是 BGO 晶体的优点), 并采用了密切结合找矿的技术路线, 同有关所、队协作, 组成联合研究组。在不到两年的时间内就研制成功 BGO γ 能谱测井仪。鉴定会专家认为, 该成果属国内首创, 已达到当时的国际先进水平。该仪器已向有关国家出口。

作者们不停留在已有的成就上, 他们进行了市场信息调研, 认为 BGO 晶体应用前景是宽阔的, 因此相继又研究成功室内 BGO γ 能谱分析仪和地面 BGO γ 能谱仪。由于 BGO 具有高的灵敏度、稳定性能好、密度大, 阻止 γ 射线能力强和康普顿散射小等优点, 所以可用于相对低本底的地热田、环境、油气、煤炭、有色金属、地质样品、小口径钻孔等方面的测量。

本书内容丰富系统、资料翔实, 不仅对从事该技术进一步开发和应用的专家们有参考价值, 对应用该技术的工程技术人员和

大专院校有关专业的师生，也有一定参考价值。

核工业北京地质研究院

吴慧山（教授）

1996. 12. 26

前 言

《BGO 伽玛能谱测量新技术》一书是基于作者将 BGO 晶体应用于地学而得的应用研究成果编写而成的。1985 年中国科学院上海硅酸盐研究所生产的优质锗酸铋（分子式为 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ，简称 BGO）晶体问世，为我国进一步研究提高 γ 射线探测灵敏度提供了有利条件。从 1985 年开始我们与上海硅酸盐研究所协作，在地质找矿方面利用 BGO 晶体进行了一系列的实验研究工作，取得了可喜的成果。

BGO 晶体在国外，从 80 年代以来已得到广泛应用，主要是用于核医学及高能物理方面。在地质找矿方面的应用也大致始于这个时期，但一般着重于 BGO 晶体与 NaI (Tl) 晶体的性能对比研究，如加拿大和美国在模型上一般是用于测量铀谱和钍谱；而前苏联则只用于总量 γ 测量等等。我们在科研方面，采用与生产相结合的方式，即科研来自于生产并服务于生产。在这个思想的指导下，根据我国的实际情况及生产中存在的问题，做了以下四方面的研究工作：

1. BGO 晶体性能基础研究。
2. BGO 晶体性能的改进。
3. BGO 晶体的应用研究，其中包括：（1）BGO γ 能谱测井；（2）BGO 地面 γ 能谱测量；（3）BGO 室内 γ 能谱测量。
4. BGO 的各种参数研究。

参加研究的单位有核工业北京地质研究院、中国科学院上海硅酸盐研究所、核工业华东地勘局二六一大队等。我们从钻孔、地面能谱测量和室内样品分析入手做了大量的广泛深入的研究工作，得到了预期效果。

目前，国内外在地质、环境、地热等领域使用的 γ 测量仪，

通常是以 NaI (TI) 晶体做探测器。由于它的密度小, 对 γ 射线的阻止能力弱, 因而计数效率较低, 往往得不到预期的效果。众所周知, 对 γ 射线的探测, 除用于寻找铀矿外, 在环境、地热、石油、煤田、有色矿种等多种领域也得到了广泛而有效的应用, 其中包括利用测 γ 射线来评价与成矿有关的地质构造。在低放射性地区进行测量时, NaI (TI) 探测器的灵敏度满足不了精度要求。即使在放射性矿床上做 γ 能谱测井, 由于受钻孔直径的限制, 用小尺寸的探测器记录能量大于 2 MeV 的 γ 射线, 其计数效率低, 给确定铀、钍含量带来严重误差。BGO 晶体比 NaI (TI) 晶体密度大, 对 γ 射线的阻挡能力强, 因此, 探测效率高, 康普顿散射影响小。但在低能段 (< 1 MeV 时) 其能量分辨率较低, 温度系数也比较大。为克服这个缺陷, 使其能在地质找矿应用中取得较好效果, 对晶体涂覆工艺技术及温度补偿技术进行了深入研究, 使 BGO 晶体的分辨率, 从 20% ~ 32% 提高到 10% 左右 (高能段峰谷比更高。而能量分辨率好于 NaI (TI)), 较好地解决了温度系数较大对测量精度的影响。这些研究成果, 在 γ 能谱测量中得到了有效地应用, 为 BGO 晶体开辟了广泛地应用领域, 此项成果属国内首创。

BGO γ 能谱测井仪采用 BGO 晶体作探测器, 比采用 NaI (TI) 作探测器灵敏度高、稳定性好和测量精度高, 不仅适合于高铀高钍含量测井, 更有效地解决了钍铀比值小的铀钍混合型矿床上难于解决的 γ 能谱测井问题, 并且也解决了 1000 m 内电缆互换问题。该仪器采用个人计算机 PC-1500A 做为数据处理系统, 具有数据采集接口, 自动测量、数据存储、绘图、解释等功能, 且体积小、重量轻, 是目前用于能谱测井比较理想的仪器。据国内外专家认为, 它填补了国内空白, 达到国际同类仪器先进水平。该型号测井仪器已出口伊朗并得到满意的应用效果。

由于 BGO 晶体应用于能谱测量, 使多用途的 GAD-6 型操作台增加了功能; 使老仪器 GP-1 发挥新的作用, 作者设计了伽玛高能谱段联合测量矿石样品中钍镭含量的分析方法, 解决了复杂

样品中钍镭的分析难题。

BGO 地面 γ 测量不仅应用于寻找放射性矿床，也有效地解决了在低放射性地区、地热测量、石油、煤田、金矿及其它有色矿种以及环境监测中的灵敏度低的问题。

BGO 应用技术的提高和创新，为以后在地学中应用 BGO 晶体做探测器打下良好的基础。在研究和开发工作中，王德梅、陆士立对 BGO 的基础研究和 BGO γ 能谱测井仪的研制做出了重要贡献；彭永祥和刘萍在 BGO 室内谱仪研制和样品分析方面提供了可贵资料，并解决了复杂样品中钍、镭的分析难题；谢海宁在测井、地面测量和参数研究中做了大量工作；何崇藩、方晶莹提供了 BGO 材料和性能数据。参加研究开发工作的还有张书成、李家俊、谈成龙等。

在 BGO 开发研究工作中，始终得到院领导和室领导的关怀，特别是吴慧山、蒋永一、狄觉斋等专家的指导及秦志民、朱德令、唐三星、钱法荣、胡智钧等的大力支持，借此机会，编著者仅对上述诸位表示真挚的感谢！

由于作者水平所限，书中难免有错，诚恳希望读者批评指正。

编著者

1996 年 12 月

目 录

第一章 新型闪烁材料——锗酸铋晶体	(1)
第一节 BGO 晶体的特性	(1)
第二节 BGO 晶体能量分辨性能的改进	(2)
第三节 BGO 晶体和 NaI (Tl) 晶体的比较	(4)
第四节 BGO 晶体温度性能的改进	(11)
第二章 BGO γ 能谱测井	(15)
第一节 用 BGO 做 γ 能谱测井的优点	(15)
第二节 BGO γ 能谱测井仪的组成及其特点	(17)
第三节 数据处理系统功能及说明	(27)
第四节 模型标定	(29)
第五节 BGO 型伽玛能谱测井仪应用实例	(31)
第三章 BGO 地面 γ 能谱测量	(53)
第一节 BGO 地面伽玛谱仪的设计方案	(53)
第二节 室内测量结果	(54)
第三节 模型测量结果	(58)
第四节 野外矿体测量结果	(59)
第四章 BGO 室内 γ 能谱分析	(61)
第一节 四道室内能谱分析仪	(61)
第二节 GP-1 单道能谱仪的改造	(66)
第三节 镭、钍含量分析	(69)
第四节 镭、钍分析结果对比	(78)
第五章 BGO 晶体的各种参数	(85)
第一节 谱段的选择	(85)
第二节 不同体积晶体的换算系数及应用领域	(88)
第三节 最佳测量时间的确定	(90)

第四节 BGO 伽玛能谱测井仪铁、水吸收系数的测定	(91)
结论	(98)
参考文献	(99)
附铁、水吸收系数图	(100)
英文摘要	(108)

第一章 新型闪烁材料

——锗酸铋晶体

锗酸铋晶体简称 BGO，是探测 γ 射线的新型材料。它对 γ 射线的探测灵敏度很高，超过通常使用的 NaI (Tl) 晶体，尤其是对探测能量范围在 1~3 MeV 的 γ 辐射有特别高的探测效率，很适于 γ 能谱测量。因此，我们把它用在地质找矿中，研究制成了用 BGO 做探测器的系列谱仪并得到应用。我们选用的锗酸铋晶体是由中国科学院上海硅酸盐研究所提供的。本章重点介绍 BGO 探测器的特点以及对其性能的改进。

第一节 BGO 晶体的特性

BGO 晶体是一种透明坚固的闪烁材料，无解理、不易碎、

表 1 BGO 和 NaI (Tl) 材料性能对比

参数 \ 晶体材料	BGO	NaI (Tl)
密度/ (g/cm ³)	7.13	3.67
有效原子系数	74	50
解理	无	100
折光率	2.13	1.85
最大荧光波长/ 10^{-10}m^*	4800	4200
荧光输出额/ %	8~16 [*]	100
光输出温度系数/ (0.01/°C)	-1~-1.5	0.22~0.9 (+)
衰减常数/ μs	0.30	0.23
额定能量分辨率/ % (0.661 MeV)	20~32	7
吸水性	无	有

* 随温度变化而变化

也不水解。其密度为 7.13 g/cm^3 ，有效原子系数为 74，折光率为 2.13，最大萤光波长为 $4800 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，衰减常数为 $0.30 \mu\text{s}$ ，萤光输出额相当于碘化钠晶体的 $8\% \sim 16\%$ ，对 Cs 的能量分辨率为 $20\% \sim 32\%$ ，光输出温度系数为 $-0.01 \sim -0.015/^\circ\text{C}$ （见表 1）。由于 BGO 晶体的能量分辨率遵从 $E^{-1/2}$ 规律，而 NaI (Tl) 晶体的能量分辨率是遵从 $E^{-1/4}$ 规律，随着能量的提高，BGO 晶体的能量分辨率逐渐高于 NaI (Tl) 晶体的能量分辨率。

第二节 BGO 晶体能量分辨性能的改进

一、与晶体分辨率有关的特点

由表 1 可见，BGO 最明显的一个优点是：密度比 NaI (Tl) 大 1.94 倍，对高能伽玛射线有较高的阻挡能力，因此具有较高的探测效率，这就是在地质找矿中特别是低放射性条件下 BGO 晶体的可取之处。由于闪烁光输出的水平低，BGO 的光输出仅有 NaI (Tl) 的 $8\% \sim 16\%$ ，而光输出是随温度变化而变化，能量分辨率在低能段比较差。一般光电倍增管的最灵敏光谱波长为 $(4000 \pm 200) \times 10^{-10} \text{ m}$ ，则在光阴极光子的有效响应方面，BGO 晶体发出的光谱也次于 NaI (Tl)，大多数光电倍增管的面板和光导材料的折射率接近于 1.5，而 BGO 的折光率为 2.13，由于晶体与光电倍增管的接触面上的反射作用，使得大部分闪光终止于晶体内部。上述因素都直接影响着晶体对能量的分辨能力。BGO 晶体能量分辨率受温度影响也很大。由于温度的变化，尤其是高温，使 BGO 晶体对能量的分辨性能变差。上海硅酸盐所提供的 BGO 晶体光输出与温度的关系特性说明，温度从 20°C （室温）上升到 60°C 时，在这 40°C 变化范围内，光输出降低到原来的 45%，即减了 55%，其温度系数为 $-0.014/^\circ\text{C}$ 。能量分辨率在 30°C 以上时，随着温度的升高而变坏，其分辨率下降的速率是 $0.0028/^\circ\text{C}$ 。在野外温度可达 50°C 则给 BGO 晶体的应用带

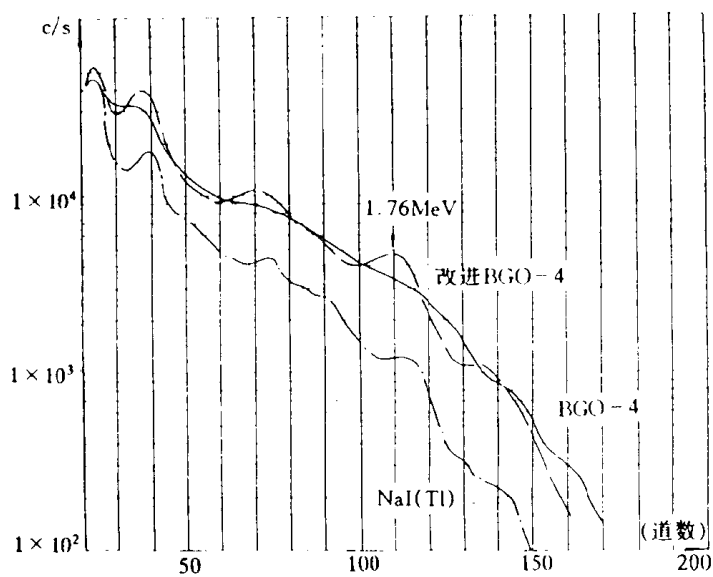


图1 NaI(Tl)晶体和BGO晶体的锒谱

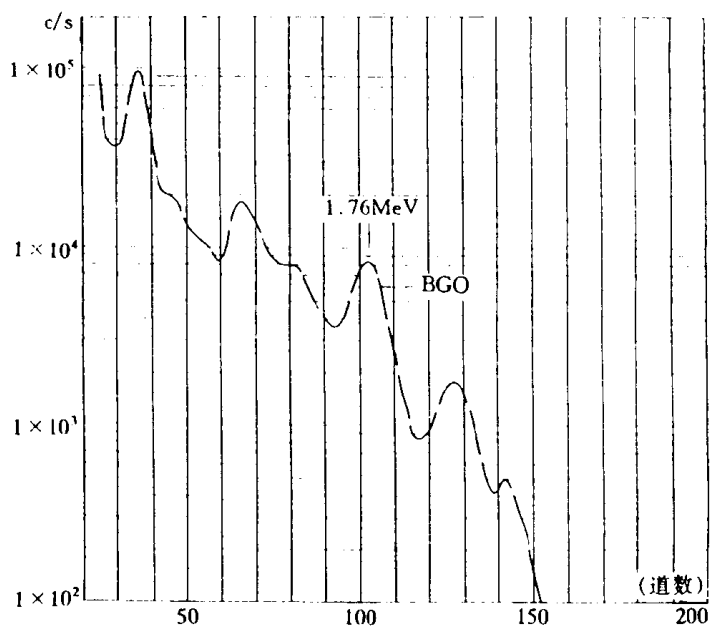


图2 BGO改进后的锒谱

来很大困难。

二、BGO 晶体对伽玛射线能量分辨性能的改进

众所周知，晶体的能量分辨率在能谱测量时很关键。用 20% ~ 32% 的分辨能力测量伽玛能谱是很困难的。图 1 是用直径 $\phi 30$ mm 高 25 mm 的 BGO 晶体，用 GDB-44 光电倍增管在多道上的测量结果。伽玛能量谱的特征峰很不明显，所以必须把分辨率提高才能用。提高分辨率从改进折射率，增加反射层两方面入手。经过十几种方案的试验研究，选出一种最佳方案，将 BGO 晶体在 Cs 峰 (0.661 MeV) 的分辨率从 20% ~ 32% 提高到 10% ~ 14%。见图 1、图 2。

第三节 改进后的 BGO 晶体 和 NaI (Tl) 晶体的比较

选用 BGO 晶体能量分辨率好于 14% 各种尺寸的晶体，在实验室点源和体源模型上与同体积 NaI (Tl) 晶体做对比测量。

一、BGO 晶体和 NaI (Tl) 晶体计数率对比

图 3 和图 4 是把直径 $\phi 50$ mm 高 50 mm BGO 晶体和同体积的 NaI (Tl) 晶体分别装入同一探头中，在镭源和钍源上用多道谱仪测量的结果。BGO 晶体在 Cs 峰的分辨率为 13%，NaI (Tl) 晶体在 Cs 峰的分辨率是 9%。从图中可以得出：在 1.12 MeV 峰 BGO 的计数率是 NaI (Tl) 的 3.8 倍；在 1.76 MeV 峰的计数率 BGO 是 NaI (Tl) 的 6.6 倍，在 2.62 MeV 峰 BGO 的计数率是 NaI (Tl) 的 7.5 倍。

直径 $\phi 20$ mm 高 40 mm 的 BGO 晶体用于伽玛能谱测井仪。测井仪操作台选用加拿大先得利公司生产的 GAD-6 四道伽玛能谱仪的操作台，各测量道能量段的阈值为：

总道 (T.C)	0.80 ~ 2.77 MeV
钾道 (K)	1.38 ~ 1.56 MeV
铀道 (U)	1.66 ~ 1.90 MeV

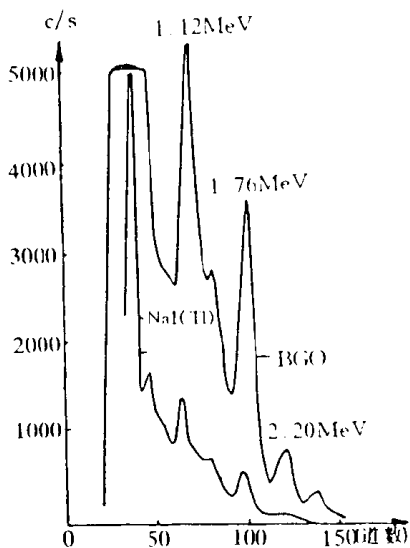


图3 $\phi 50$ mm 高 50 mm NaI(Tl) 和 BGO 晶体 Ra 谱对比

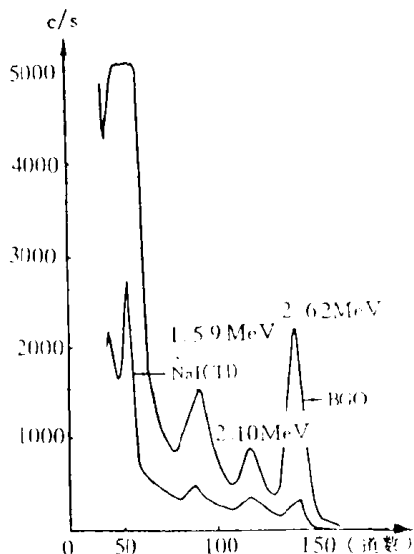


图4 $\phi 50$ mm 高 50 mm NaI(Tl) 和 BGO 晶体 Th 谱对比

钍道 (Th) 2.44~2.77 MeV

图5和图6是直径 $\phi 20$ mm $\times$ 40 mm BGO 晶体和同体积的

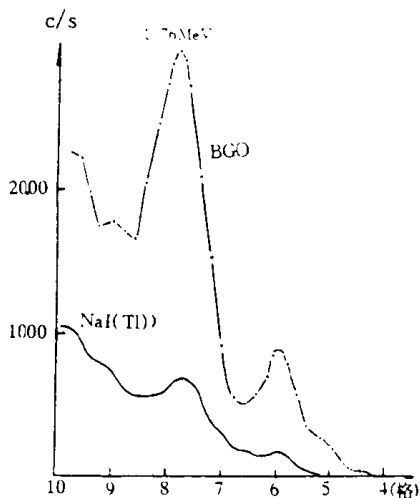


图5 UF-0.2-1号模型 γ 谱

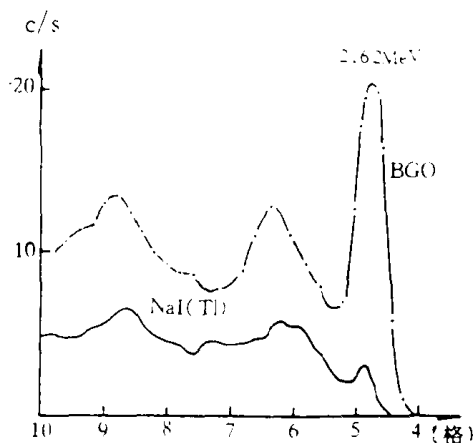
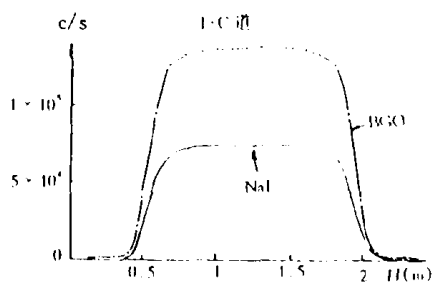


图 6 ThF-0.3- I 号模型 γ 谱

(a)



(b)

(c)

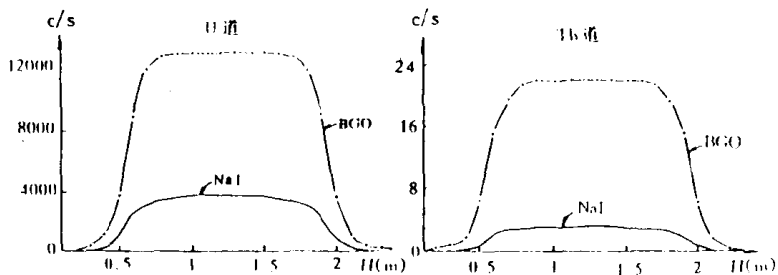


图 7 UThF-0.2-0.07- I 号模型脉冲计数比较

NaI (Tl) 晶体，在测井模型上分别用 UF-0.2 和 ThF-0.3 铀、钍模型测量的结果，计算出计数率之比，铀模型的铀道：BGO 的