

# 用于激光接收的热电探测器

冯 锡 淇

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

张 添 立 邵 黎 埏

(上海无线电六厂)

## Pyro-electric detectors for laser light

*Feng Xiqi*

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica)

*Zhang Tienli Shao Lixun*

(Shanghai No. 6 Radio Factory)

### Abstract

LiTaO<sub>3</sub> detectors for weak laser signals and pyro-electric detectors for coherent radiation were developed. The area of device and the effect of heat transfer of substrate on the frequency spectrum of device noise are discussed. Some practical applications of pyro-electric detectors in laser technology are given.

### 一、引 言

热电探测器的性能介于光子探测器和热探测器之间,具有中等的探测率和响应速度,但重要的是它有着一些独特的优点,使它成为红外探测器中适用面极广的探测器。它在室温下工作,光谱范围极宽,能承受大的辐射功率,在牺牲灵敏度的情况下可达到极短的响应时间( $10^{-10}$  秒),稳定可靠,并能制作复杂形状和大尺寸的器件,所有这些,使它在激光技术领域中有十分广阔的应用前景。

快速热电探测器用于激光脉冲的研究,包括激光脉冲波形观察,能量和空间分布测

量,最快的探测器响应时间已达到 170 微微秒<sup>[1]</sup>或更短;电定标热电探测器可以对连续、重复频率或单脉冲激光进行功率或能量定标,对脉冲宽度约 3 毫微秒、平均功率电平为微瓦到毫瓦量级的脉冲激光作能量测量,误差  $<5\%$ <sup>[2]</sup>,选择合适的吸收涂层甚至可以对 X 射线、 $\gamma$  射线进行测量;当然,热电探测器与其它红外器件一样可用于微弱激光信号的接收,而且由于它是一种良好的平方律探测器,因此也可以用外差方式进行探测,使灵敏度大大提高,这对于远红外波段的激光接收是很有意义的。例如,热电相干辐射探测器已成功地应用于 HCN 激光 (337 微米) 和微

收稿日期: 1978 年 11 月 21 日。

波(3厘米)的接收,等效噪声功率分别为  $1 \times 10^{-12}$  和  $8 \times 10^{-13}$  瓦/赫<sup>[3]</sup>。此外,热电探测器的线列、象限、二维阵列元件可以用于激光束准直和方位测量以及脉冲激光能量的空间分布测量。无疑地,作为激光接收的一种新工具,热电探测器必将得到更广泛、更深入的应用。

众所周知,钽酸锂是一种优异的热释电材料,居里温度高达  $618^\circ\text{C}$ , 矫顽场极高,并具有良好的加工性能和耐受激光的能力,因此对激光应用是十分合适的。我们研制了钽酸锂激光弱信号探测器和热电相干辐射探测器,前者具有较大的面积(灵敏区直径  $\phi 3$  和  $\phi 5$  毫米),后者的灵敏区与金属热沉直接接触。文中就器件面积、衬底热传导对器件噪声频谱的影响进行了讨论,以便为合理使用和提高器件性能提供依据。此外,还测定了在大的红外入射功率密度下热电探测器输出信号的线性范围。最后就热电探测器在激光技术中的应用实例作简单介绍。

## 二、激光弱信号探测器

在激光技术中常常遇到微弱光信号的检测问题,例如在激光测距、通讯、大气传输研究、空气污染监测中,激光经过长距离的传输、反射、散射、吸收以后,信号将大为减弱。在可见光、近红外范围,有很多高灵敏的探测器可供选择,并不造成困难,但在长波红外区,如  $8 \sim 14$  微米或更远的波段,热电探测器就显得难能可贵了。

对探测器来说,检测微弱激光信号和一般的红外测温基本是一样的,这里着重讨论低频和中频( $< 1$ 千赫)使用的热电探测器。我们注意到,在一些红外接收系统中,由于工作原理的限制(例如气体分析仪或双光束光谱仪),或获得远红外光学部件的困难,常常不希望使用聚焦系统;或者最后获得的接收光斑面积较大。显然,在这些场合如果使用

大面积的热电探测器,并配以窄带、低噪声、高输入阻抗的前置放大器,将使这些系统的信噪比大为改善。此外,使用大面积器件有可能进行全光斑接收,这对于单模或模式稳定的激光束特别有价值。当然小面积器件同样能用于微弱信号探测,仅性能较差而已。

我们研制了具有较大灵敏区面积的钽酸锂热电探测器,灵敏区直径分别为  $\phi 3$  毫米和  $\phi 5$  毫米。外形见图1。 $\phi 5$  毫米的器件,由于设有合适的测试系统,未测数据。如上所述,对激光弱信号探测来说,这些器件的结构及制备工艺与常规的热电探测器相同。对  $\phi 3$  毫米器件,晶片尺寸为  $3.5 \times 3.5$  毫米<sup>2</sup>,采用改装的 TO-5 管座,晶片直接用 DAD-3 导电胶粘置在管柱上,悬空结构,不带衬底,探测率  $D^*(500, 80, 6)$  为  $1.0 \sim 1.6 \times 10^8$  厘米·赫<sup>1/2</sup>/瓦。

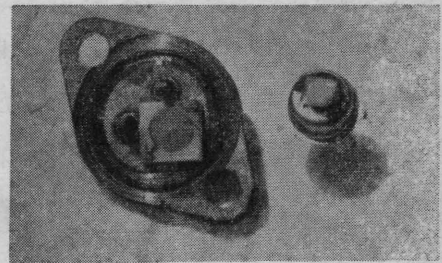


图1 大面积探测器外形

热电探测器的噪声频谱随器件的尺寸而异,为此,分析这些器件的噪声机制对于合理使用以及改进器件性能是十分重要的。热电探测器/前置放大器的全部噪声可表示为:

$$V_n = \left[ \frac{2qI_{GSS}\Delta f}{\omega^2 C^2} + \frac{4KT\Delta f}{R_L\omega^2 C^2} + \frac{4KT \operatorname{tg} \delta \Delta f}{\omega C} + \Delta V_{SC}^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $T$ : 环境温度;  $K$ : 玻尔兹曼常数;  $q$ : 电子电荷,  $\omega$ : 光调制频率;  $C$ : 器件电容与放大器输入电容之和;  $\operatorname{tg} \delta$ : 器件的损耗角正切;  $I_{GSS}$ : 场效应管栅漏电流;  $\Delta V_{SC}$ : 场效应管短路噪声;  $\Delta f$ : 前置放大器带宽。

测量了  $\phi 3$  毫米器件在  $30 \sim 1000$  赫范围内的噪声谱,作为比较也列出了厚度与它接

表1 探测器  $L_6$  和  $L_2$  的器件参数

器件编号	灵敏区直径 $D$ (毫米)	面积 $A$ (厘米 <sup>2</sup> )	厚度 $d$ (厘米)	电容 $C_0$ (微微法)	直流阻抗 $R_0$ (欧姆)	正切损耗 $\text{tg}\delta$
$L_6$	$\phi 3$	$7.05 \times 10^{-2}$	$2.6 \times 10^{-3}$	109	$4.5 \times 10^{11}$	$3.6 \times 10^{-3}$
$L_2$	$\phi 0.8$	$5.02 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	6.6	$1.0 \times 10^{12}$	$3.3 \times 10^{-3}$

近, 面积为  $\phi 0.8$  毫米的器件的测试结果, 这二只器件的主要参数列于表 1(室温  $30^\circ\text{C}$ )。

已知  $I_{GSS} = 3 \times 10^{-11}$  安培 ( $30^\circ\text{C}$ ), 场效应管偏置电阻  $R_g = 6 \times 10^{10}$  欧姆,  $\Delta f = 6$  赫, 放大器输入电容 6 微微法,  $\Delta V_{sc}-f$  曲线为实测数据。

图 2 表示器件  $L_6$  和  $L_2$  的噪声频谱, 图中曲线是根据 (1) 式代入上列数据所得的计算值, 与实测结果基本符合。计算结果表明, 对大面积器件, 在低频和中间频率区, 电流噪声和损耗角正切噪声是主要的, 当频率大于 500 赫后, 场效应管短路噪声逐渐占主导地位; 而小面积探测器在大部分频率范围内以电流噪声为主,  $V_n \propto \frac{1}{\omega}$ , 即使在 1 千赫左右, 短路噪声尚不足道。当然, 由于测试是在高的环境温度下进行的,  $I_{GSS}$  值较大, 如果是在低的环境温度下, 短路噪声在较低的频率下将成为主要噪声。因此, 在使用大面积探测器时, 应注意挑选  $\Delta V_{sc}$  小的场效应管。至

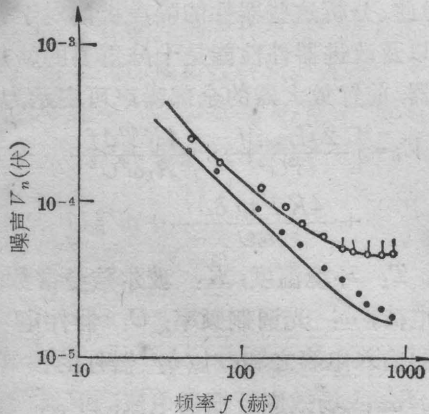


图2  $\phi 3$  毫米热电探测器的噪声频谱  
空心圆点表示探测器  $L_6$  的实测噪声,  
实心圆点表示探测器  $L_2$  的实测噪声;  
实线为理论计算噪声值

于大面积器件的低频性能, 虽然减少厚度可以有效地降低器件噪声, 但考虑到器件的成品率, 除非有好的加工办法(如离子研磨), 这种作法常常是得不偿失的。在测试中我们发现, 正如 Stokowiski<sup>[4]</sup> 所指出的那样, 由于热电耦合的存在, 器件的  $\text{tg}\delta$  值与晶片的装架方式有关, 另外, 晶片和管座的表面处理对  $\text{tg}\delta$  值也有影响, 所以, 器件的  $\text{tg}\delta$  值实际上是一个对工艺敏感的量。

我们曾测定过探测器探测率的频率特征曲线。当调制频率  $f = 500$  赫时,  $D^*$  (500, 500, 6) 约为  $1 \times 10^8$  厘米·赫<sup>1/2</sup>/瓦左右(灵敏区面积  $\phi 1, \phi 2$  毫米), 500 赫以上因设备所限, 未进行测试。如果选用小面积器件, 并配以频率补偿放大器展宽频带, 探测器可以在较高的调制频率下工作。

### 三、热电相干辐射探测器

#### 1. 热电探测器的输出线性问题

除上述弱信号接收外, 在一般的激光应用中, 入射辐射强度高是共同的特点。不言而喻, 探测器在高强度辐射下的输出是否呈线性是衡量探测器优劣的重要标准之一。尤其是光外差探测器, 要求在高的本机振荡功率下保持线性, 因此必须对探测器输出线性范围有确切的了解。热电探测器的输出信号可表示为:

$$V_s = R_V W \quad (2)$$

$R_V$  为器件的电压响应率,  $W$  为器件接收的入射辐射功率。电压响应率  $R_V$  为:

$$R_V = \frac{\eta P(r)}{\omega \epsilon S A} \quad (3)$$

$\eta$ ——上电极吸收率;  $P_{(T)}$ ——热释电系数;  
 $S$ ——体积比热;  $A$ ——灵敏区面积。(3)式  
 中的  $\eta$ 、 $\omega$ 、 $A$  都是与温度  $T$  无关的常数。  
 $\frac{P_{(T)}}{\varepsilon S}$  正是热电材料的响应率优值因子。根  
 据 Berman<sup>[5]</sup> 的测量结果, 钽酸锂晶体从  
 25°C 到 100°C,  $\frac{P_{(T)}}{\varepsilon S}$  值的变化不到 4%, 由此  
 可见, 在接收大功率入射辐射的情形下, 钽酸  
 锂探测器的电压响应率估计不会有显著变  
 化。烟中义式<sup>[6]</sup> 的研究还指出, 带有高热导  
 率热沉(铜)的热电探测器, 在入射光连续照  
 射下, 当吸收热与发散热达到平衡时, 元件表  
 面的温升将趋于一恒定值。因此可以预料,  
 即使是在大功率辐照下, 钽酸锂探测器的输  
 出线性的也将是良好的。

我们曾测量了红外入射低功率辐照下热  
 电探测器的输出特性, 辐射源为 500 K 黑体,  
 改变元件至黑体炉辐射孔的距离以改变入射  
 功率。测试结果表明: 当入射辐射在  $4 \times 10^{-3}$   
 瓦/厘米<sup>2</sup> 到  $4 \times 10^{-4}$  瓦/厘米<sup>2</sup> 范围内, 输出呈  
 线性(图 3)。

还测量了脉冲光照射下热电探测器的输

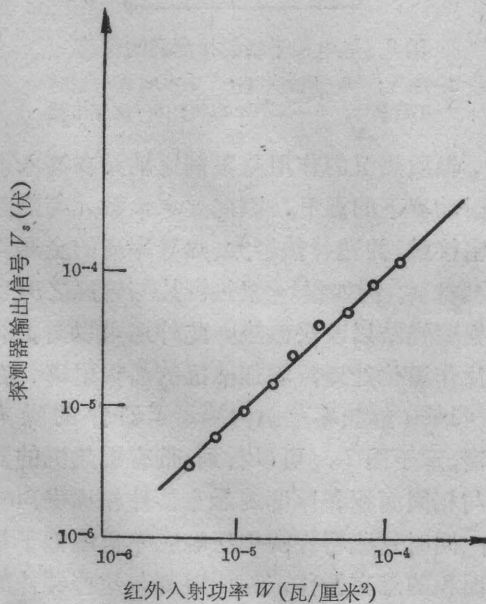


图 3 热电探测器信号输出特性  
 (低功率密度, 连续光)

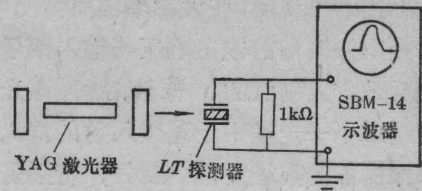


图 4 热电探测器输出特性测试装置

出特性, 测量装置见图 4。

以 YAG: Nd<sup>3+</sup> 激光器为光源, 激光束的  
 发散度约 2~3 毫弧度。当照射点离激光器  
 相当远时, 认为激光束能量沿截面近似均匀  
 分布。调节探测器与激光器的距离以改变入  
 射功率密度, 激光脉冲宽度约 0.4 毫秒, 每次  
 脉冲的能量约 1.1 焦耳。探测器的灵敏元带  
 有银质热沉, 探测器的输出经 1 千欧姆负载  
 电阻直接进入 SBM-14 示波器, 器件电时间  
 常数(包括电缆影响)远小于激光脉宽, 测试  
 结果见图 5。结果表明, 当入射激光脉冲功率  
 密度在  $5 \times 10^3$  瓦/厘米<sup>2</sup> 到  $1.1 \times 10^4$  瓦/厘米<sup>2</sup>  
 范围内, 钽酸锂热电探测器的输出是线性的。  
 注意该直线的延伸线并不通过原点, 这是因  
 为激光脉冲能量和脉冲宽度的测量误差较  
 大, 以及激光束沿光束截面分布的不均匀性,  
 造成光功率密度的误差。

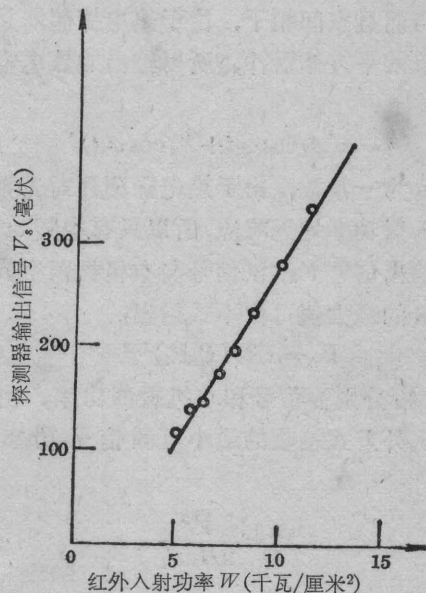


图 5 热电探测器的信号输出特性  
 (高功率密度, 脉冲光)

上述结果说明,在大功率辐照情况下,钽酸铷热电探测器的输出电压与输入信号的线性关系是令人满意的。诚然,脉冲激光所得到的结果不一定适用于连续入射的情况,但如果探测器的灵敏元散热良好,特别是厚度较薄的情形下,可以预料在连续大功率辐照下也会有良好的线性输出。

## 2. 热电相干辐射探测器

在上节中已经证实,热电探测器是一种良好的平方律探测器,即器件的输出信号正比于入射功率(或正比于辐射场平方)。所以它既可用于直接探测,也可按照光外差方式探测。使用光外差探测方式将极大地提高热电探测器的灵敏度,例如以TGS探测器作10.6微米激光外差探测,最小可测功率 $P_n^h$ 为 $2 \times 10^{-15}$ 瓦/赫<sup>[3]</sup>; 钽酸铷器件的 $P_n^h$ 值也已达 $2 \times 10^{-14}$ 瓦/赫<sup>[7]</sup>。虽然这些数值比致冷型碲镉汞光二极管差得多,但由于它室温工作,而且可用作远红外甚至亚毫米波范围的相干辐射探测,因而仍然很有价值。

光外差探测原理如下: 设一弱连续波信号 $E_s = A_s \cos \omega_s t$ , 在热电探测器上和一个强的本机振荡 $E_l = A_l \cos \omega_l t$ 混频, 这两束光相互平行而且空间相干, 由于热电探测器是一个精确的平方律器件, 所以输出的热电流为:

$$i = \alpha (A_l \cos \omega_l t + A_s \cos \omega_s t)^2 \quad (4)$$

式中 $\alpha$ 为一常数, 由于热电探测器对光频及平均入射功率均无响应, 所以只有中频 $\omega_s - \omega_l$ 给出输出信号 $V_h$ , 该信号与本机振荡空间相干,  $V_h$ 的最大值可由下式给出:

$$V_h = \alpha R_V (P_s P_l)^{1/2} \quad (5)$$

$P_s$ 和 $P_l$ 分别为信号和本机振荡功率, 由此可求出外差式接收的最小可测信号功率 $P_n^h$ 为:

$$P_n^h = \frac{\bar{V}^2}{2R_V P_l} \quad (6)$$

式中 $\bar{V}^2$ 是器件的总噪声。由于本机振荡功率 $P_l$ 可以取得很高, 一般估计, 与直接法相

比, 外差法的接收灵敏度可望提高 $10^7$ 倍。

我们试制了一些供光外差探测用的钽酸铷器件, 管蕊结构如图6所示。灵敏区分别为 $\phi 0.8$ 和 $\phi 2.0$ 毫米, 厚度各约15和20~25微米。晶片按常规制备热电探测器的工艺蒸发上、下电极, 将底面用银浆直接烧结(300°C)在银质热沉上, 银片上的小孔是为了减少上电极引出点的无效电容。实践证明这些器件具有良好的散热性能, 可以经受较大能量的脉冲激光多次照射而不致碎裂, 激光功率密度约为10千瓦/厘米<sup>2</sup>, 照射速率1次/秒, 照射次数>50次, 估计这些器件可以在强的本机振荡功率下工作。

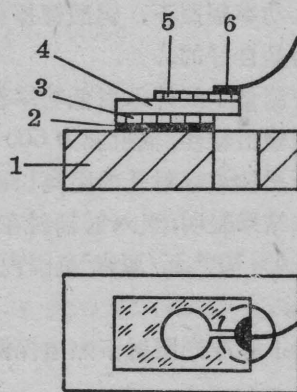


图6 热电相干辐射探测器的管蕊

1—银片; 2—烧银电极; 3—Cr/Au电极;  
4—LT晶片; 5—Ni/Cr电极; 6—烧银电极

银质热沉的作用是限制灵敏元在高入射辐射功率下的温升, 因此要求灵敏元与热沉紧密接触, 并选择热容大、热导率高的金属作热沉材料, 例如银。银热沉片与管座之间也用银浆烧结以改进散热。此外还可以对银热沉片作黑化处理, 增加热沉的热辐射率。在30~1000赫频率范围内测量了器件的噪声频谱, 示于图7。可以看到, 带有银热沉的器件与相同面积和厚度的悬空器件相比噪声较高; 同时这些器件的电压响应率也略低于相同面积的悬空器件, 其原因都与这些器件的灵敏区与热沉直接接触而引起的对环境热导增加有关, 讨论从略。为了改进热电相干辐

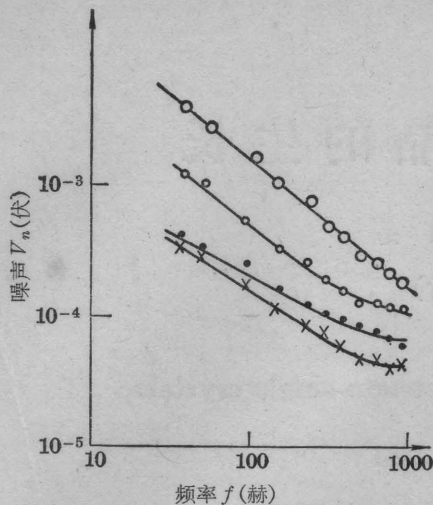


图7 热电相干辐射探测器的噪声频谱

○— $\phi 0.8$  带银热沉；○— $\phi 0.8$  悬空结构；  
●— $\phi 2.0$  带银热沉；×— $\phi 2.0$  悬空结构

射探测器的性能，应选用短路噪声尽可能低的场效应管；本机振荡激光器要有极好的稳定性；在器件允许的范围内尽可能提高本机振荡功率。此外在制作这种探测器的工艺过程中，应特别注意表面抛光质量，因为在高频情形下，形成信号的关键部位是在近电极薄层内，由于金属—铁电体接触界面的特殊性，表面层的性能不同于体材料，而且强烈依赖于加工质量<sup>[8]</sup>，这一点应引起重视。

宽带工作的热电探测器还存在压电谐振问题。按图6所示的管蕊结构有可能消除压电谐振。

#### 四、应用

上述器件有些正在试验中，有些应用已取得结果，现简单介绍如下：

1. 上海光机所的红外高反膜反射率精密测定装置中使用钽酸锂探测器作接收器，该系统的测量标准误差达到  $\pm 0.04\%$ ，以一次测量结果为例，对一金膜球面腔反射率的测试结果，12次测试的平均值为 0.9892，均方差仅为  $\pm 0.0004$ 。当探测器受到 15 毫瓦激光直接照射时，线性仍然良好。据称，只要

更换激光光源，该系统也适用于其它波长。

2. 上海师范大学物理系在  $\text{CO}_2$  激光大气传输研究中，使用钽酸锂器件作激光接收器，在能见度为 30~200 米，零级雾情况下，测量了激光大气传输的大量特性参数，包括衰减系数和后向散射的角度分布。探测器无硫化锌窗口，性能稳定，重复性好。

3. 上海师范大学物理系研制了  $\text{CO}_2$  激光大气污染长程监测仪，可以对空气中多种有害气体进行监测。对乙烯的测量灵敏度约为 10 ppb/公里；丙烯腈约为 100 ppb/公里。该仪器共使用了三只不带硫化锌窗口的钽酸锂探测器，其中 2 只 ( $\phi 2$  毫米) 对可调谐  $\text{CO}_2$  激光器的输出进行监控，另一只  $\phi 3$  毫米的器件接收返回的激光束，由于器件面积较大，因此返回的激光束经反射镜聚焦后，为全光斑接收，这对于提高该仪器的稳定性起了很大的作用。为了排除大气湍流引起的低频调制效应，调制频率取 200 赫和 150 赫。多次试验表明：钽酸锂探测器稳定、可靠、不娇气，仪器多次测量数据的波动  $< 1\%$ 。

综上所述，热电探测器在激光技术中是大有可为的，但目前还存在一些问题，如：探测率低，波长 1 微米以下响应率下降更多，特别是带热沉的探测器差距更大等等。总之，器件性能有待提高，品种有待发展，对一些新应用需要探索。

#### 参 考 文 献

- [1] C. B. Roundy *et al.*; *Opt. Commun.*, 1974, **10**, 374.
- [2] J. Geist; *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **28**, 171.
- [3] A. C. Baynham *et al.*; *Inter. Conf. on Submillimeter Waves and their Appl.*, 1974, 153.
- [4] S. E. Stokowski; *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **29**, 393.
- [5] H. P. Berman; *Infrared Phys.*, 1975, **15**, 225.
- [6] 烟中义式, 上颌香山, “东北大学电通谈话会记录”, 1971, **40**, 22.
- [7] S. J. Lee; *Physica*, 1973, **67**, 119.
- [8] R. Lane; *Trans. and J. Brit. Ceram. Soc.*, 1974, **73**, 65.