

廊坊市机佳数控设备有限公司

地址：河北省廊坊市光明西道 194 号

电话：13933929580

磁振精密材料

赵宇彤 Yutong.zhao@yigsphere.com

YIG 振荡器系列(一)——激荡 60 年代

振荡器，一种产生非常精确频率的电信号的一种装置。最著名的莫过于晶体振荡器(晶振)。石英晶振的广泛应用于各种电子产品中，此外还应用于为控制器集成电路、计算机主板、手机、通信网络、钟表等各个领域，起着至关重要的作用。晶振的常见频率通常在 0.032MHz(实时时钟) -1075MHz(显卡的像素时钟)之间。如果想要获得 GHz 级别的高频的振荡器，YIG 振荡器则是一个绕不开的话题。

近些年，压控石英振荡器 (voltage-controlled oscillator, VCO) 的频率最高可扩展到 18GHz，逐渐蚕食了 YIG 振荡器的市场。YIG 振荡器价格相对昂贵 (单价)，但是在需要超低相位噪声的高质量器件方面仍然主导高频振荡器市场(5-40GHz)。据笔者调查，YIG 振荡器在 2021 年的市场规模(北美)保守估计可达 2000 万美元。

世界上第一个 YIG 振荡器

世界上第一个 YIG 振荡器(原型机)可以追溯到 1965 年。来自于 Cutler-Hammer, Inc 公司 (如今是伊顿公司 Eaton Corporation 的一部分) 旗下的 Airborne Instruments Lab (机载仪器实验室) 的两位工程师 W. J. DAUKSHE 和 J. J. HAMILTO 最先在 Proceedings of the IEEE 上报了 YIG 调谐的振荡器。它使用了 1956 年刚刚合成的 YIG 材料——直径为 0.050 英寸 (大约 1.27mm) 的 YIG 球体、和德州仪器的 SA-1828 硅基晶体管。二者缺一不可。而此时正值半导体行业发展方兴未艾的时期，对于高频器件的需求，导致了 GHz 级别的 YIG 振荡器同时也呼之欲出。

第一个 YIG 振荡器所用的 YIG 所测得的饱和磁化强度为 330 高斯，(从饱和磁化强度来看，这并不是高纯 YIG，而是用镓掺杂了以后的 Ga:YIG，特别为低频应用制作的。) 以及线宽为 1 奥斯特。由于 Ga:YIG 很难直接达到高频，因此工程师巧妙的使用了二级谐波做倍频处理，因此可以把频率提高到 8GHz。

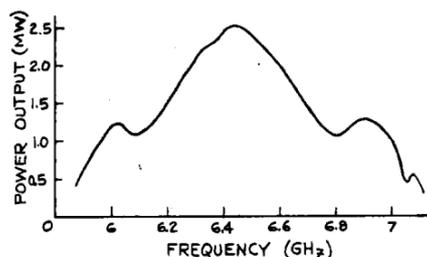


Fig. 1. Second harmonic power vs. frequency.

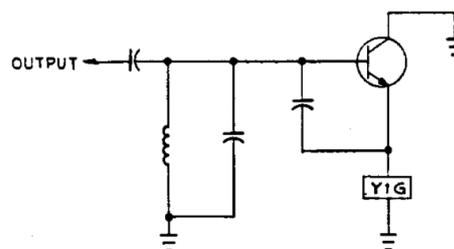
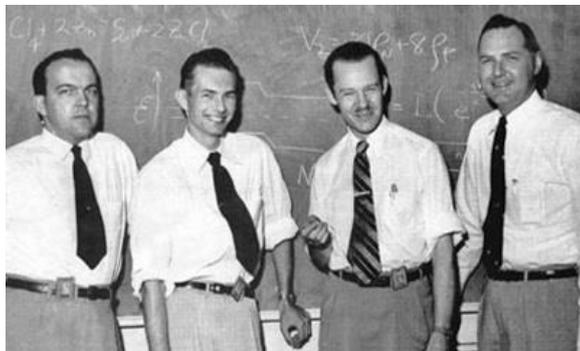


Fig. 2. Schematic diagram.

(左)YIG 振荡器输出功率和频率的关系 (右)设计电路示意图，使用了共基电路。

题外话:

晶体管是 20 世纪最伟大的发明。最初的晶体管都是用锗制造的。随着半导体工业的发展, 1954 年 4 月德州仪器(Texas Instruments)最先研制出了硅基晶体管并将其推向市场。虽然在这 3 个月前, 贝尔电话实验室的 Tanenbaum 就已经研制出来了世界上第一个硅基晶体管, 但可惜的是贝尔实验室并不觉得这个发明有商业上的吸引力。这在 11 年后又催生了 YIG 振荡器的发明。



在德州仪器研发硅基晶体管的团队, 摄于 1954 年。

从左到右, 分别是 W. Adcock、M. Jones、E. Jackson 和 J. Thornhill。

书归正传。同年, 机载仪器实验室的 D. H. HORNBOSTEL 把掺杂 YIG 换成了纯 YIG 并测定了外磁场和频率的关系。此时 YIG 直径变成 0.040 英寸(约 1 毫米), 饱和磁化强度为 1750 高斯。但此时的振荡器还依赖于外界磁场。而且输出功率变化过大, 因此还无法商业化。

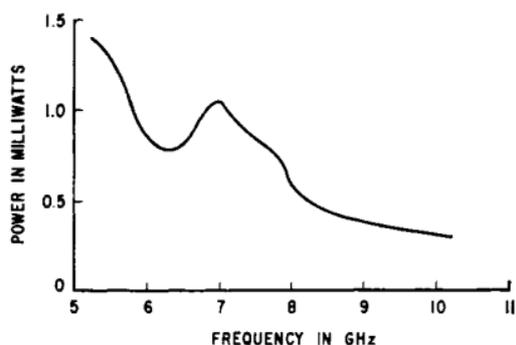


Fig. 1. RF power vs. frequency.

(左)输出功率和频率的关系

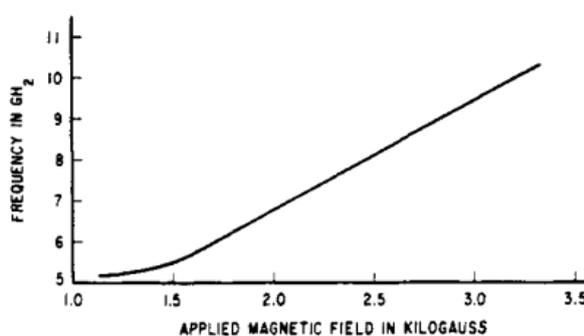
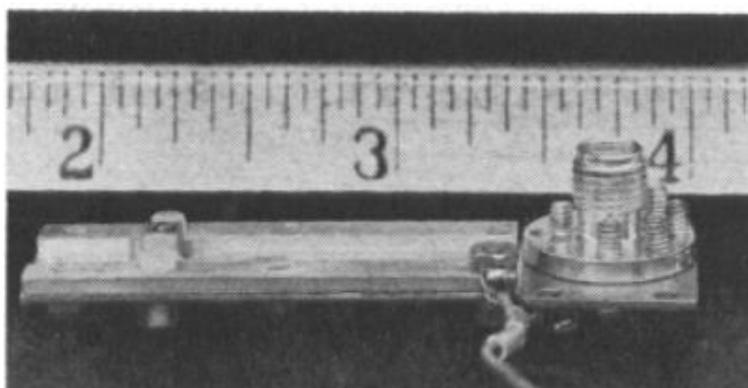


Fig. 2. Tuning curve.

(右)调谐外磁场和 YIG 频率的关系



最早的 YIG 振荡器, 图中右侧是 OSM 接口。

后续优化

1967年，美国 Sylvania electronic product 公司的工程师 K. Hunton 制作出了两款新型振荡器。其中一款是 YIG 调谐振荡器。此设计改善了 DAUKSHE 和 HAMILTO 设计中输出功率变化过大的问题。此时使用的 YIG 球仍是掺镓 YIG。晶体管则是德州仪器的 SS7285。

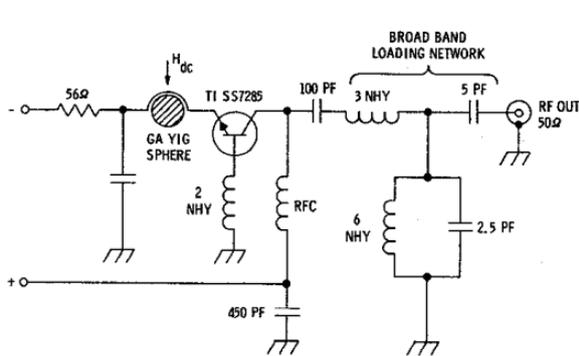


FIG. 3 - YIG Tuned Oscillator Circuit

(左)设计电路示意图。

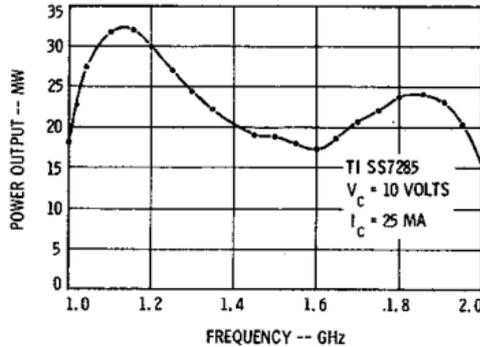


FIG. 4 - YIG Tuned Oscillator Power vs Frequency

(右)输出功率和频率的关系

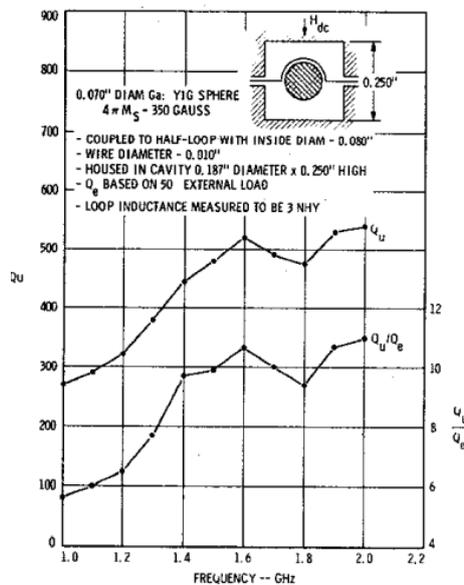


FIG. 2 - Measured YIG Resonator Q Data

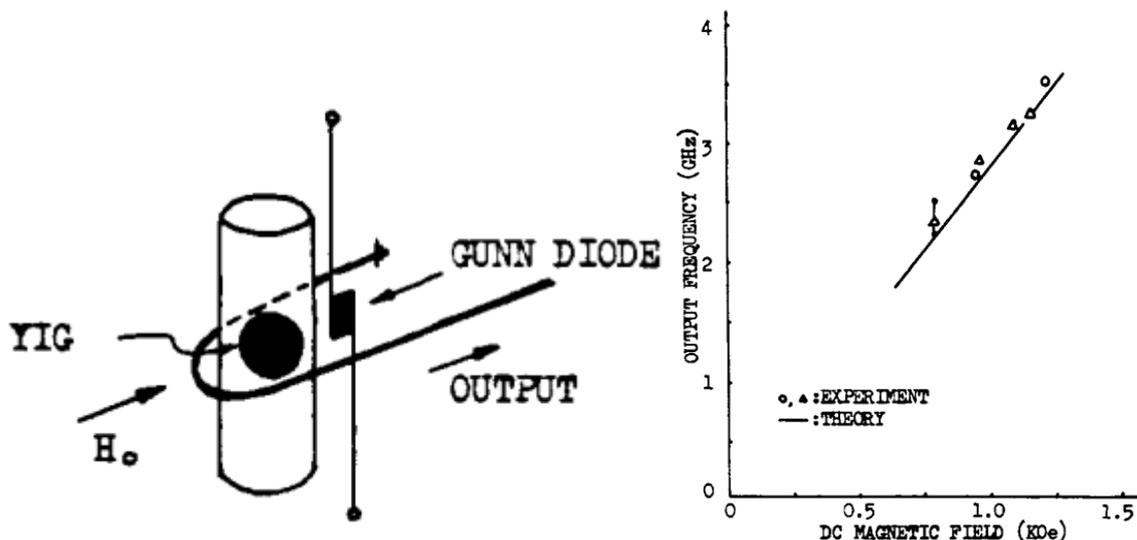
YIG 谐振器的 Q 值(unloaded)随频率的变化。
以及 unloaded 和 loaded Q 值的比值。

此时科学家和工程师们已经意识到，平稳的输出功率非常重要，并且在有意识地优化这一点。同时也给电路加上了后置滤波电路，滤除不需要的波段。此时的 YIG 球的 Q 值已经来到 500 附近，已经是那个时代比较不错的质量了。

行书至此，已经有两个美国高科技公司先行一步，并且表现出了浓厚的兴趣，虽然都是原型机，但是距离商业化应用也并不遥远。问题来了，这小小的 YIG 还能掀起怎样的波澜，请听我下回分解。

日本的尝试

1967 年同年，来自日本大阪大学的工业和科学研究所的 N.S. Chang; T. Hayamizu; Y. Matsuo 提出了一种使用 YIG 球体和耿氏二极管的振荡器模型。他们的实验使用了直径为 1.26mm 的 YIG 球体，具体的耿氏二极管并未给出具体型号。



(左)实验设计示意图。

(右)磁场和输出频率的关系。

但是日本学者这篇文章中的设计还很粗糙，发现也仅限于 YIG 共振频率与外磁场强度之间的线性关系。不过的确是第一个公开的文章提出将 YIG 与耿氏二极管结合起来的点子。

不过值得注意的是，他们的 YIG 球体由三菱电机提供。可能日本人很早就尝试制造过 YIG 材料。

美军方的影子

还是 1967 年，来自美国 Sperry Corporation 公司的马萨诸塞州 SPERRY RAND 研究中心的 Martin 和 Minden 发表了“电子可调谐二极管振荡器”研究报告。

该报告描述了一项关于使用钇铁石榴石对渡越时间二极管振荡器进行电子调谐的调查。介绍了渡越时间二极管的微波特性，包括等效电路和噪声特性。构建了一个能够在 700 MHz 频带上进行电子调谐的原型，并提供了初步数据。

该文的唯一一份记录收录于美国国防技术信息中心(defense technical information center)，但是电子版的全文并未收录。

1968年，刚刚提到的 Sperry Corporation 公司的 Martin 在一年后又提出了一个新的设计。将其一年前的 700MHz 设计提高到 x 波段，但是这次他用了 YIG 圆环而非 YIG 球体。这个设计的特点是发射功率比之前其他人的设计都大很多。

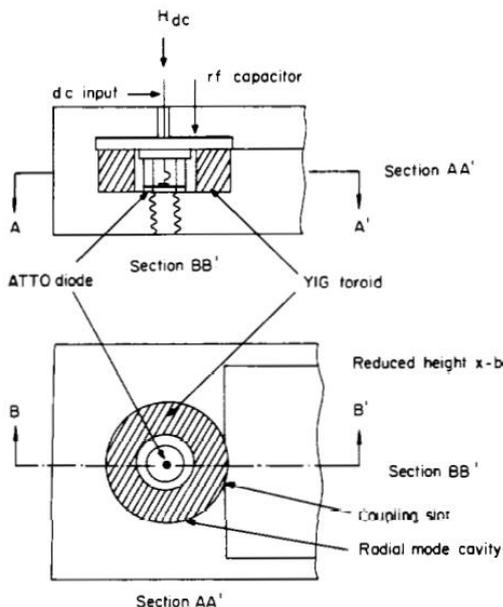


Fig. 1. Cross section of YIG-toroid-tuned avalanche transit-time oscillator.

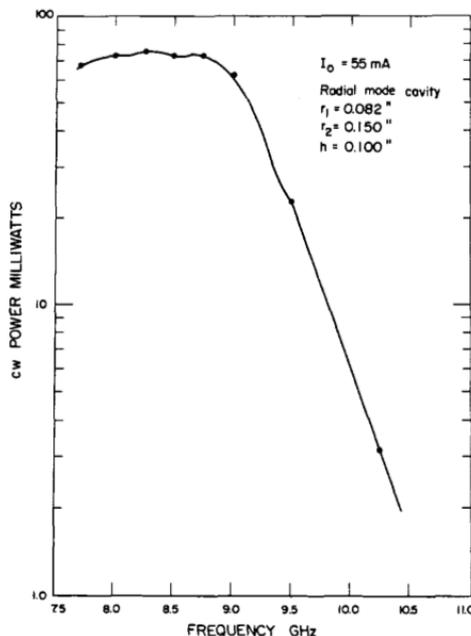


Fig. 5. CW output power of diode oscillator as a function of frequency.

(左)设计示意图。

(右)连续波输出的功率-频率曲线。

大英帝国的入场

来自英国北爱尔兰贝尔法斯特女王大学电器工程系的 J. A. C. STEWART 提出使用碰撞电离雪崩渡越时间二极管(IMPATT 二极管)来设计 YIG 振荡器。但是从效果来看还比较粗糙。

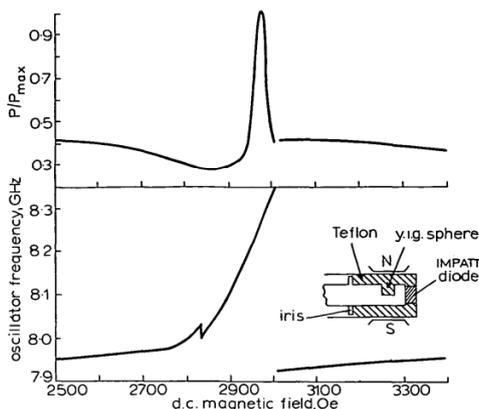


Fig. 2 Experimental tuned-oscillator performance

磁场-功率曲线(上)和 磁场 - 频率曲线(下)

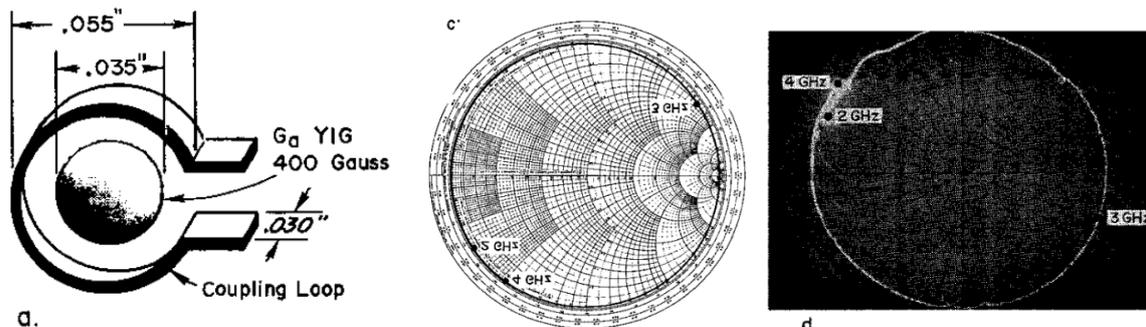
此时英国学者就已经被 YIG 球体的质量困扰了，他们认为如果 YIG 的线宽更小，则可以将器件优化到更好。而且他们的 YIG 远未达到当时能制造的最优。

此时各方意识到 YIG 振荡器在高频上面的优秀表现，试图突破那层最后的屏障，究竟鹿死谁手，且听我下回分解。

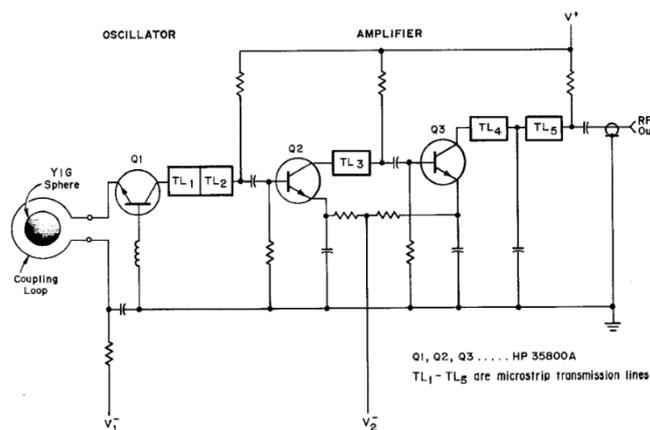
1969 年——世界上第一个商业 YIG 振荡器

巨头入场——惠普

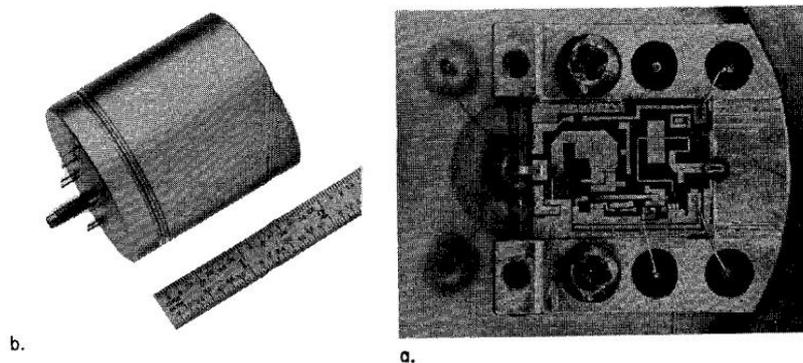
时间来到 1969 年，惠普公司(Hewlett Packard company)的 John J. Dupre 在 1969 G-MTT International Microwave Symposium 会议上展示了第一款商业 YIG 振荡器。《具有宽带缓冲放大器的 1.8 至 4.2 GHz YIG 调谐晶体管振荡器》。该振荡器使用了最新的 HP 35800A 晶体管 and 放大电路。



(左)YIG 球及其耦合结构。(中)理论计算的史密斯图。(右)实际测量的史密斯图。



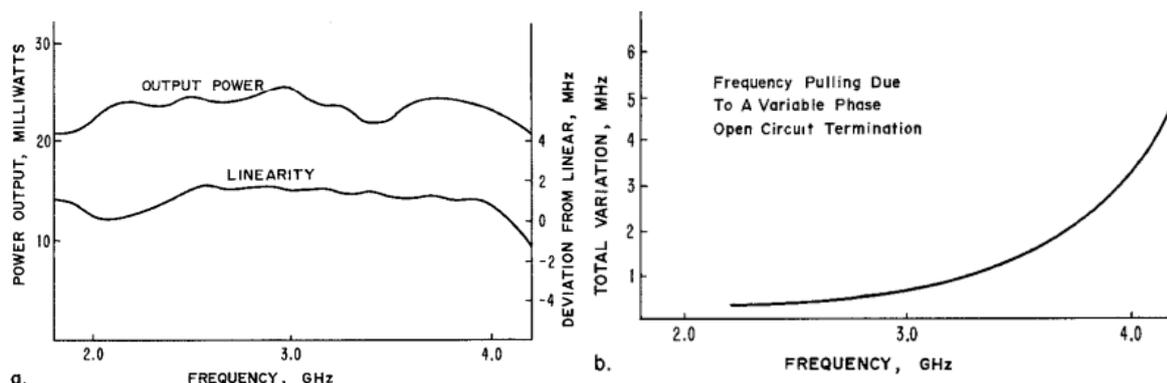
电路示意图。使用了两级放大电路设计，一共有三个晶体管。



(左)拥有气密和磁闭外壳的 YIG 振荡器。(右)内部的电路设计。

这个惠普公司的设计已经奠定了现代 YIG 振荡器的基本结构。频率范围在 1.8GHz 到 4.2GHz 之间。最高频率调制率为 1MHz。调谐线性率好于 0.1%。此时磁场调谐已经集成到振荡器内部。此时的 YIG 振荡器已经成为一个独立的、可集成的电子器件。

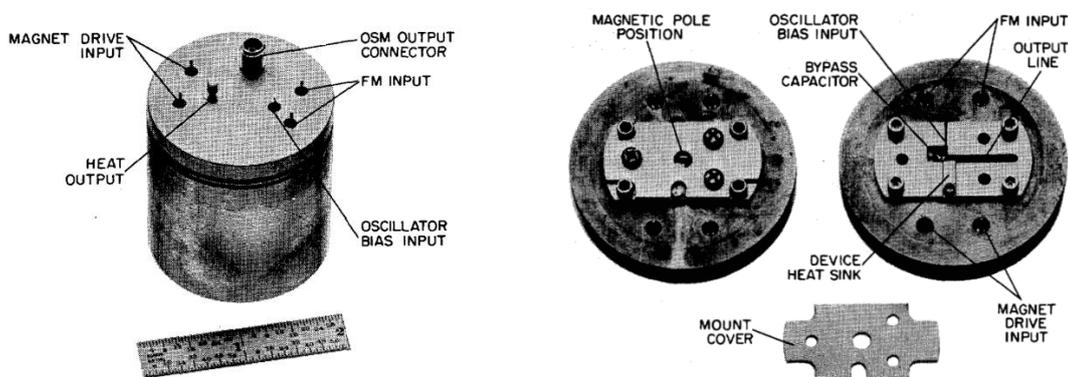
一些关键指标:



(左) 频率和输出功率以及调谐线性度的关系。(右) 频率牵引随频率变化的关系

同年，还是来自于惠普公司的 D. C. Hanson 提出了一种“YIG 调谐-转移电子振荡器”。基于转移电子振荡效应（又称耿氏效应、基于其原理的器件为耿氏二极管）。英国科学家 J. B. Gunn 在 1962 年于 IBM 工作期间发现了耿氏效应，催生了第一个不需要真空管的廉价微波源。

这个系列的 YIG 振荡器使用了直径为 0.010-0.020 英寸 (0.25mm – 0.50mm) 的 YIG 球体并采用了 GaAs 振荡器设计把放大电路放到了一个蓝宝石薄膜上。



(左图)展示了组装好的 YIG 调谐转移电子振荡器的封装。整个装置的直径为 1.8 英寸，长度为 2.0 英寸，重量为 18 盎司。通过一个密封的 OSM 接口输出微波。散热通过一个内部连接到外壳的铜柱完成。整个设备是磁闭的，以满足更复杂的环境条件。还可以通过其他引脚控制调谐磁铁共振频率并进行频率调制(调频 FM)。

(右图)展示了磁铁盖和封装设计的内视图。磁极构成了微波电路的一个表面，以尽量减少所需的磁铁驱动电流。振荡器的偏置输入通过一个大电容旁路接地，以抑制任何可能发生的低频振荡。块状砷化镓(GaAs)器件、YIG 球体和调谐结构被安装在一个单独的散热器上，整个电路可以提供可调节的耦合输出。

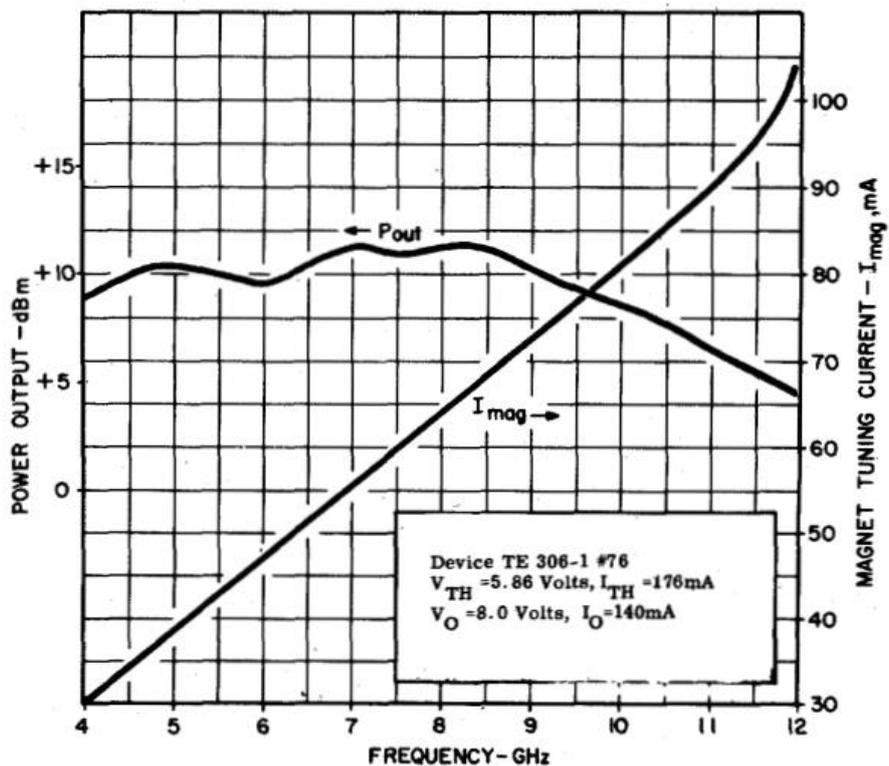


FIGURE 3—Power output and magnetic tuning current as a function of frequency.

输出功率和频率的关系。
以及频率和磁场调谐电流的关系。

看到这里，你以为惠普是唯一一个推出产品的公司吗？如果你这么认为，那么就大错特错了，YIG 振荡器就在同时就已经有了不少竞争，这个竞争者来头虽然没有惠普那样如雷贯耳，但也是来头不小。不过欲知究竟，且听我下回分说。

同台竞争——瓦里安联合公司

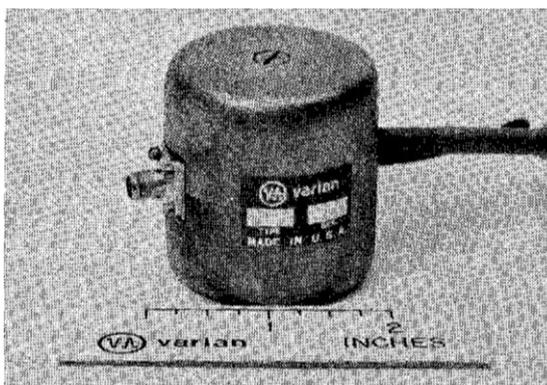
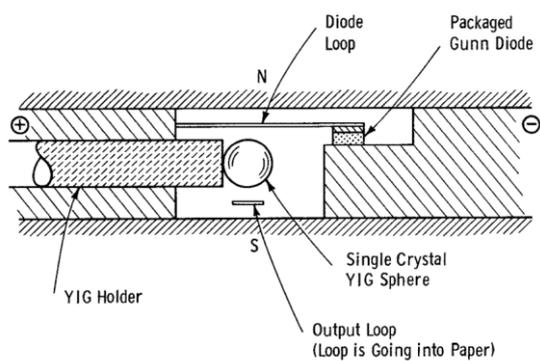
1969年，瓦里安联合公司的 Masahiro Omori 在之前提到的同一个会议中，发布了 YIG 调谐的基于耿氏谐振电路的振荡器。



瓦里安公司的 LOGO。

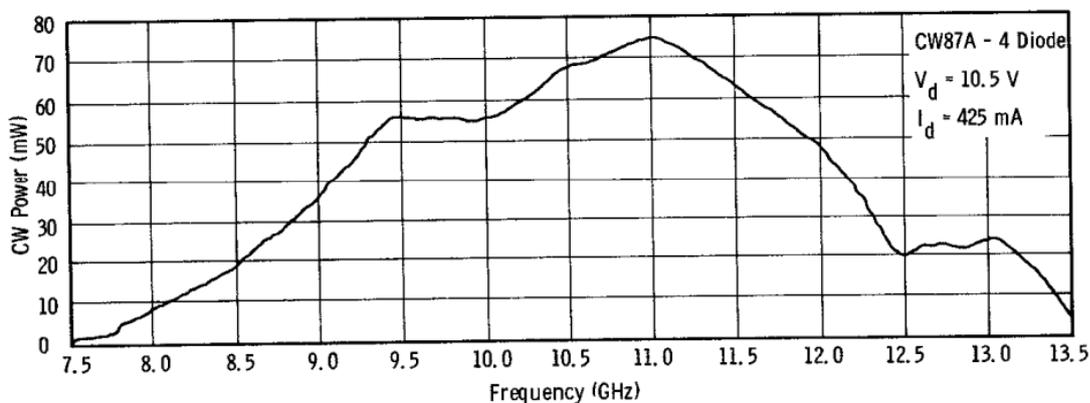
题外话：

我的事业生涯和瓦里安这个公司结下了不解之缘。不过这就是后话了。创立于 1948 年的 Varian Associates 是硅谷最早的高科技公司之一。1999 年，瓦里安联合公司被一拆为三。分别是 Varian Semiconductor(半导体业务)、Varian Medical Systems(医疗系统业务)、Varian, Inc.(科学仪器业务)。后瓦里安半导体 Varian Semiconductor Equipment Associates 于 2011 年被应用材料公司(Applied Materials)收购。

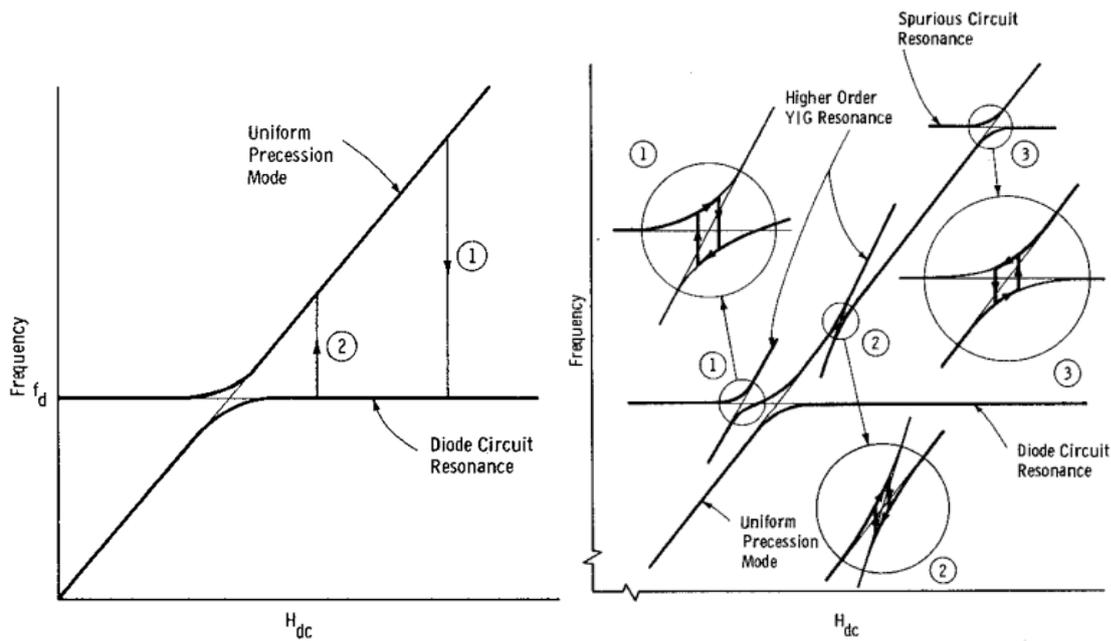


(左) 设计示意图。

(右) 瓦里安的产品实物。



连续波输出功率-频率曲线。



(左) YIG 球的 $\langle 110 \rangle$ 模式与二极管共振模式的耦合。

(右) YIG 球的高阶模式与二极管共振的耦合。其中的 Spurious Circuit resonance——杂散电路模式，可能来自于耿氏二极管的其他模式或者高阶模。

通过上图不难看出，对于线性调谐，最低调谐频率应略高于二极管电路的谐振频率以避免耦合区域。对于平滑的往复调谐，从二极管到 YIG 谐振器以及从 YIG 谐振器到输出电路的耦合应使二极管与输出电路良好匹配。

早在设计 YIG 振荡器的同时，就已经观察到了来源于耿氏二极管的腔光子与磁振子的耦合效应。 f_d 是电路共振频率，uniform precession mode 即为 YIG 的 $\langle 110 \rangle$ 模式由磁场强度控制。

YIG 的杂模和二极管的杂模，在大多数情况下，都引入了非互易的频率跳跃和功率跳跃（这可能涉及到 YIG 材料的非线性克尔效应，这时的作者还没有意识到这种效应）。高阶模式和均匀进动模式之间的耦合可能是由氧化铍(BeO)陶瓷的 YIG 支架引起的，它破坏了 YIG 球形谐振器正常模式之间的正交关系。(这并不一定正确，因为正常 YIG 中微小的缺陷也会造成正交关系的破坏造成模式之间的耦合，而完美的 YIG 并不存在)

总之，此时 YIG 的质量，尤其是对杂模的抑制，在 YIG 振荡器的设计之中显得至关重要。瓦里安公司也是第一个报告了杂模对于 YIG 振荡器影响的公司。

YIG 诞生于 1956 年，此时的国际局势风起云涌。科技产业日新月异。二战期间射频设备的大规模应用，催生了高频微波的巨大需求，尤其是分米波雷达和厘米波雷达的工作波段。行书至此，这个激荡的 1960 年代结束，下一个 1970 年代开启。

欲知后事如何，且听下回分解。

术语定义:

振荡器的频率牵引(frequency pulling): 由负载阻抗的变化引起的生成频率的变化。
振荡器的频率推移(frequency pushing): 由阳极电流(或阳极电压)变化引起的频率变化。

参考文献:

- [1]. Dauksher, W. J., and J. J. Hamilton. "YIG-tuned transistor local oscillators operating to 8 GHz." Proceedings of the IEEE 53.10 (1965): 1660-1660.
- [2]. Hornbostel, D. H. "5-10 Ghz YIG-tuned tunnel-diode oscillator." Proceedings of the IEEE 53.11 (1965): 1751-1751.
- [3]. Tanenbaum, Morris. Bell Labs Notebook No. 25505, page 30 (January 26, 1954).
- [4]. Van Valkenburg, Mac E. Reference data for engineers: radio, electronics, computers and communications. Elsevier, 2001.
- [5]. Hunton, K. "YIG Tuned and Varactor Tuned L-Band Transistor Oscillator." 1967 G-MTT International Microwave Symposium Digest. IEEE, 1967.
- [6]. Hanson, D. "YIG-tuned transferred electron oscillator using thin-film microcircuits." 1969 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. Vol. 12. IEEE, 1969.
- [7]. M. Omori, "The YIG-Tuned Gunn Oscillator, Its Potentials and Problems," 1969 G-MTT International Microwave Symposium, Dallas, TX, USA, 1969, pp. 176-181, doi: 10.1109/GMTT.1969.1122681.
- [8]. Chang, N. S., T. Hayamizu, and Y. Matsuo. "YIG-tuned Gunn effect oscillator." Proceedings of the IEEE 55.9 (1967): 1621-1621.
- [9]. Grace, Martin I., and Henry T. Minden. ELECTRONICALLY TUNABLE DIODE OSCILLATOR. SPERRY RAND RESEARCH CENTER SUDBURY MA, 1967.
- [10]. Stewart, J. A. C. "Magnetic tuning of coaxial IMPATT oscillators." Electronics Letters 24.4 (1968): 526-527.
- [11]. Day, W. B., and W. M. Jones. "X-Band Solid-State Oscillator and Mixer." 1969 G-MTT International Microwave Symposium. IEEE, 1969.
- [12]. Vane, A. B., and V. E. Dunn. "A digitally tuned Gunn effect microstrip oscillator." Proceedings of the IEEE 58.1 (1970): 171-172.
- [13]. Grace, M. I. "Magnetically tunable transit-time oscillator." Proceedings of the IEEE 56.4 (1968): 771-773.
- [14]. Dupre, John J. "A 1.8 to 4.2 GHz YIG tuned transistor oscillator with a wideband buffer amplifier." 1969 G-MTT International Microwave Symposium. IEEE, 1969.