



长波长光通信 ——器件和元件

[日] 野田健一等著

CHANGBOCHANG
GUANGTONGXIN

长 波 长 光 通 信

——器 件 和 元 件

〔日〕野 田 健 一 等著

石忠诚 朱龙德 周汝生 译

人 民 邮 电 出 版 社

特集 长波长光通信(《电子材料》)

1979年12月

内 容 提 要

长波长光纤通信是当前光通信的发展方向。这本小册子介绍目前居世界先进水平的长波长光纤通信用的元件和器件。主要内容有:长波长光通信用的光源(半导体激光器和发光二极管)、探测器(半导体光电二极管)以及传输线(石英光纤)和长波长光通信用的一些其它无源元件的最新资料。

长 波 长 光 通 信

——器件和元件

〔日〕野田健一等著

石忠诚 朱龙德 周汝生 译

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/32 1981年5月第一版

印张: 4 页数: 64 1981年5月天津第一次印刷

字数: 89千字 印数: 1—3,600册

统一书号: 15045·总2471—有5200

定价: 0.43元

译 者 的 话

光纤通信是七十年代发展起来的新一代通信技术。受到了世界各国的重视。

光纤技术的进步推动着光纤通信的发展。以中继距离为例：1974年，光纤的最低损耗在波长为 $0.85\mu\text{m}$ 附近为 2 dB/km ，容许中继距离为 8 km ；1976年，光纤的最低损耗在波长为 $1.3\mu\text{m}$ 附近为 0.5 dB/km ，容许中继距离为 80 km ；1978年，光纤的最低损耗在波长为 $1.55\mu\text{m}$ 附近为 0.2 dB/km ，容许中继距离为 200 km 。由此可见，随着光纤技术的进步，光纤通信逐渐向长波长发展。这里所谓的长波长，就是波长比 $0.85\mu\text{m}$ 长的意思。具体地说，现在讲的长波长是 $1.0\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$ 。

因为长波长更有利于实现长距离、大容量的传输，所以长波长光纤通信特别引人注目。实现长波长光纤通信的关键问题首先是它的器件和元件，因此对他们开展广泛和深入的研究是目前和今后一个时期内工作的重点。

长波长光纤通信的研究在国内也已开始，为了帮助有关单位和有关同志了解国外的情况，我们翻译了这本小册子。

本书主要介绍目前居世界先进水平的长波长光纤通信用的器件和元件，即作为光源的半导体激光器和发光二极管、作为探测器的半导体光电二极管、作为传输线的石英光纤和一些其它长波长无源元件等。

本书内容译自日本《电子材料》杂志1979年12月号刊载的《长波长光通信专集》，对文章的个别处略有删节。全部译文请中国科学院半导体研究所杜宝勋同志作了审阅。但是，限于水平，错误和不妥之处，敬希读者批评指正。

译 者

1980年4月

• 2 •

目 录

长波长光通信用的器件和元件展望.....	1
长波长光通信用的光源.....	12
武藏野通研的InGaAsP/InPDH 激光器.....	31
KDD的InGaAsP/InPDH激光器.....	38
日立的 InGaAsP/InPDH 激光器.....	44
三菱电机的 InGaAsP/InPDH 激光器.....	53
富士通研究所的 InGaAsP/InPDH 发光二极管.....	58
长波长光通信用的光探测器.....	67
武藏野通研的InGaAsP/InPAPD.....	78
日电的InGaAsP/InPAPD.....	84
KDD 的 InGaAsAPD.....	91
长波长光通信用的光纤.....	99
长波长光通信用的无源元件	112

长波长光通信用的器件和元件展望

I. 长波长低损耗光纤的开拓和光传输特性

最早确认光纤具有取代电缆而成为新传输介质的可能性是在1970年。后来, 光纤的传输损耗逐年迅速降低, 使其传输的有效性变得愈来愈高。图1-1表示用光纤传输3次群(PCM)信号时可能的中继距离逐年延长的情况。用半导体激光器作为光源, 并在计算中忽略光源与光纤的耦合损耗, 1974年对最低损耗光纤在波长为 $0.8\mu\text{m}$ 附近计算的中继距离约为8 km。

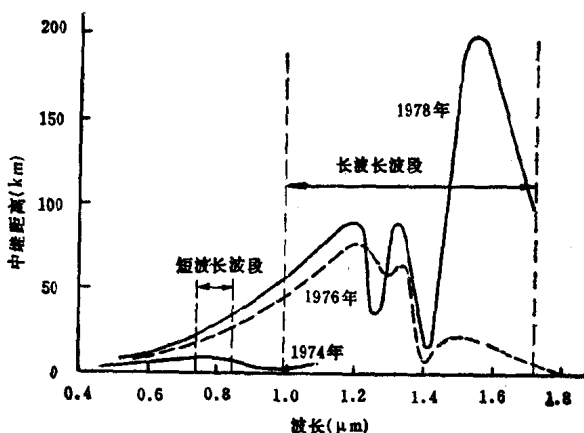


图1-1 长波长的开拓和中继距离的延长

那时, 室温受激发射的半导体激光器的材料是 AlGaAs , 只能得到 $0.8\mu\text{m}$ 附近的相干光, 故很多研究者感到光纤的最低损耗波长与半导体激光器的相干辐射波长一致, 这对光传输的

研究者来说的确是一件幸运的事情。但是，研究者也预见到光纤的真正最低损耗在更长的波长处，因而积极准备长波长的测试设备，向光纤的最低损耗前进。

1976年在波长 $1.2\mu\text{m}$ 处得到了损耗 0.5dB/km 的光纤¹⁾。如图1-1中的虚线所示，利用这种光纤，中继距离可以达到 80km 。然后，继续努力降低光纤的损耗，1978年在波长 $1.5\mu\text{m}$ 处实现了中继距离 200km 。

光纤的损耗机理是逐渐被弄清楚的。为了降低光纤的损耗，必须减少光纤中引起吸收的杂质，以及控制引起色散的气泡和折射率分布的微观不均匀性。然而，光纤在红外波段内的损耗是由 Si-O 对晶格振动引起的吸收，而在短波长处则是由光纤的微观不均匀性引起的瑞利散射决定的。因此，可以推算出石英材料光纤的损耗极限。如图1-1中标记为1978年的一条曲线所示，去除光纤中残留的微量水（OH根）分子振动引起的在波长 $1.25\mu\text{m}$ 和 $1.4\mu\text{m}$ 处的损耗峰，就可以得到达到低损耗极限的光纤。采用这种除去水分子振动的达到低损耗极限的光纤，在 100Mb/sec 和 800Mb/sec 的PCM传输中，中继距离的推算值如图2所示。图1-2还给出了以前进行的从 100Mb/sec 到 1.6Gb/sec 传输的实验数据。显而易见，数据是逐年更新的。

选择带隙与长波长低损耗光纤匹配的化合物半导体的组份并掌握该化合物材料的液相外延生长条件，就能得到室温连续工作的长波长半导体激光器。光传输研究者认真考虑了这个低损耗波段的实际应用，尤其是中继距离为 200km 的光纤通信。若中继距离能达到 200km ，则在陆上通信中不要电缆管道中继器也能获得优良的可靠性。在海底通信中，可以减少中继器数量，提高经济性和可靠性。而且，在波长 $1.3\mu\text{m}$ 附近，光纤的

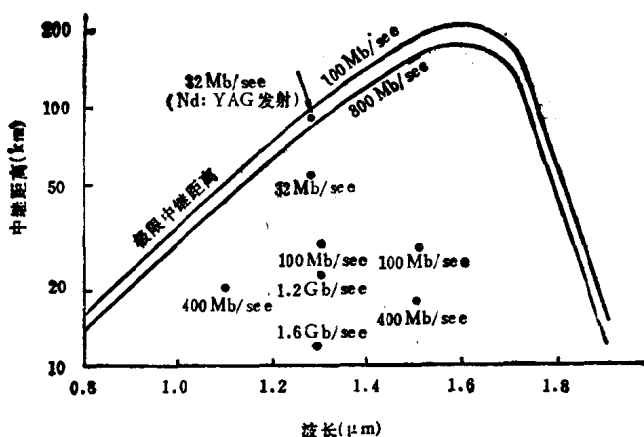


图1-2 石英光纤通信的极限中继距离和实验数据

色散（结构色散与材料色散之和）为 0。若用单模光纤，则可以实现超高速数字传输。即使采用海底光缆，也可以铺设多条，实现超大容量传输。

Ⅱ．在不同波段内石英光纤传输的比较

进行光传输的石英光纤，在从 $0.8\mu\text{m}$ 到 $1.6\mu\text{m}$ 这样宽的波长范围内，都具有可能低的损耗特性，这就对光传输的设计者产生了应该选用哪个波段的问题。若把整个范围分成以 $0.8\mu\text{m}$ ， $1.1\mu\text{m}$ ， $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 为中心的四个波段，并从使用的立场出发进行比较，其传输特性如表 1-1 所示。该表比较直观，而且都是定性的，仅代表现阶段的研究水平。显然，随着技术不断进步，是要发生变化的。从表中列举的比较项目看来，若想尽快投入使用，则只好选用 $0.8\mu\text{m}$ 波段。但是，若以性能好和中继距离尽可能长为目标，则应该选用色散居第二位，光纤成本居第四位，而损耗居首位的 $1.55\mu\text{m}$ 波段。

表1-1 石英光纤传输波长的比较

波长(μm) 比较项目	0.8	1.1	1.3	1.55
损耗	4	3	2	1
色散	4	2	1	2
光纤成品率	1	2	2	4
光纤成本	1	2	2	4
耦合损耗	4	3	2	1
激光器寿命	3	1	1	4
应用特性	1	3	2	4

〔注〕：表中的数字表示优劣，1最优，2其次，3再次，4最劣。

III. 长波长半导体器件和材料

1. 光源

光源是光传输中最重要的器件之一。最广泛使用的光源是半导体激光器，其次是用相同半导体材料制作的发光二极管。在谈到长波长半导体激光器之前，首先回顾一下短波长半导体激光器发展的历史。GaAs半导体激光器在1970年实现了室温连续受激发射。半导体激光器的制作有几项基本工艺，即解理形成谐振腔（1962），提出双异质结构（1963），采用滑动石墨舟的液相外延生长（1970），采用平面条形或质子轰击条形结构（1971）等。由于科学不断发展，这些工艺技术在旧更替的竞争中日臻完善。半导体激光器的室温连续受激发射就是在这些技术齐备的情况下实现的。但是，最初只能得到远不能满足实用要求的短寿命器件。经过7~8年的努力，由于外延生长和有关技术的进步，激光器的可靠性才大为改善，达到了实际使用的要求。因为提出了很多革新方案，如无摩擦接触法，在有源区中掺Al或Mg，在 H_2 和GaCl气氛中外延生长，抑

制炭氢杂质的产生等等，所以才能外延生长出优质的晶体。

在半导体激光器的研究课题中，最重要的是寿命研究。为了获得长寿命器件，研制者在成品率还不高的时期就抢先进行了长时间连续工作实验，同时尝试了高温老化寿命实验。为了查明器件退化的机理，同时使用了多种观察手段。如光荧光，电致发光，扫描电镜，透射电镜，X射线形貌等等。结果，可以观察引起快速退化的贯通位错、激光器端面的光损伤、制作过程中引进的缺陷等。还可以估算不能直接观察的点缺陷，这些点缺陷将决定激光器的极限寿命。通过上述观察研究，改善了外延晶体的生长工艺，建立了防止光损伤的措施，从而使半导体激光器至少具有提供现场使用的寿命。

下面把话题转向长波长半导体激光器。实验证明，光纤的最低损耗是在比AlGaAs激光器的发射波长 $0.8\mu\text{m}$ 更长的波段内。如果说1976年是开拓长波长激光器的头一年，那么电公司通研在四年前就获得了GaAlSb/AlGaAsSb双异质结构室温脉冲工作的激光器，其波长为 $0.98\mu\text{m}$ 。从1975年起，各国加快了用InP作为衬底的InGaAsP激光器的研究。不久，美国麻省理工学院，日本电公司通研和KDD等公司获得了长波长室温连续受激发射的激光器。电公司通研的长波长激光器发展的历史如图1-3所示。

综上所述，首先投入实际应用的半导体激光器的波长在 $0.8\mu\text{m}$ 附近，即所谓短波长激光器。后来， $1.0\sim 1.6\mu\text{m}$ 的所谓长波长激光器才逐步走向实际应用。那么，在更长的波段内如何呢？在波长从 $0.1\mu\text{m}$ 到 10mm 的5个量级间，可以产生光波乃至电磁波的手段是什么呢？图1-4表明了其中一部份。若能使该图左侧所示的材料组份变化，则在各自用粗线表示的波长范围内有可能获得激光器。

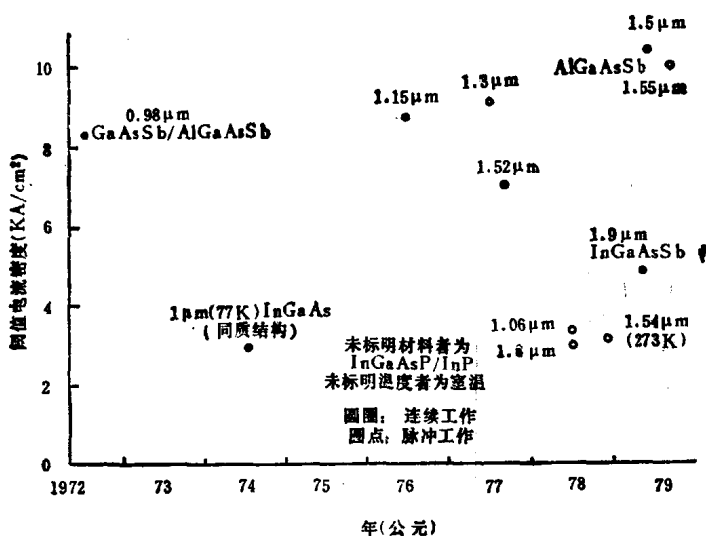


图1-3 长波长半导体激光器发展的历史

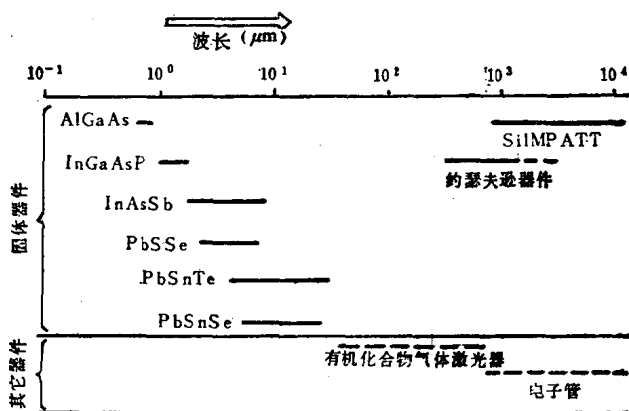


图1-4 超长波固体器件的开拓

其中AlGaAs和InGaAsP的波长接近实际应用的范围。该图右侧所示的Si碰撞雪崩渡越时间二极管和电子管是微波器件，其发射频率取决于电磁回路。从该图可见，有可能获得波长超过 $1.0\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$ 的激光器。但是，从光纤传输的角度看来目前尚未获得在该波段内低损耗的光纤。

2. 光探测器

光纤传输中的光探测器，多数是采用具有p-n结或肖特基结的通过带间吸收产生光生载流子的半导体结型探测器。为了进一步提高光探测的灵敏度，也采用雪崩倍增大光电流的雪崩光探测器(APD)。APD的灵敏度高，即量子效率高。由倍增引起的散弹噪音和由暗电流引起的肖特基噪音均低。从可见光波段到 $1\mu\text{m}$ 波段，Si光探测器具有灵敏度高、雪崩倍增噪音低、响应速度快等特点。对波长为 $0.85\mu\text{m}$ 的PCM传输，探测器的最低探测水平与传输速率的关系如图1-5所示。

当波长超过 $1.0\mu\text{m}$ 时，因为Si探测器的灵敏度降低，所以

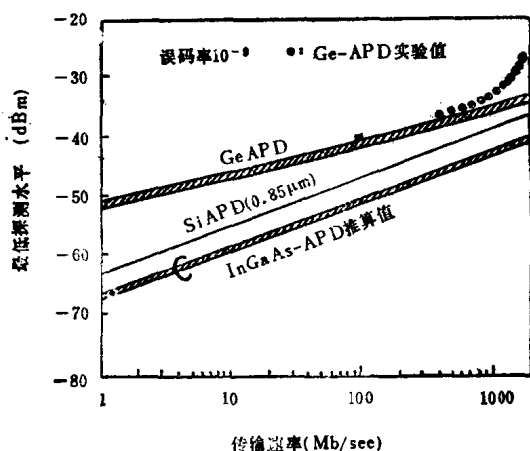


图1-5 雪崩光二极管的最低探测水平

有必要采用带隙比Si窄的Ge和三元或四元Ⅲ-V族化合物半导体(InGaAs, GaAsSb, InGaAsP等)。其中,最接近实用的是Ge。Ge-APD的最低探测水平如图1-5所示,图中的圆点是实验值。在波长 $0.85\mu\text{m}$ 处,比Si差 $5\sim 10\text{dB}$,这主要是Ge-APD的暗电流大的缘故。在 $1.0\sim 1.6\mu\text{m}$ 波段内,最好采用Ⅲ-V族化合物半导体光探测器。如图1-5所示,在 $0.85\mu\text{m}$ 处,有可能得到比Si低若干dB的最低探测水平。但是,到目前为止还没有得到最低探测水平比Ge低的器件。

IV. 长波长器件

1. 固体激光器

人们过去曾认为,固体激光器作为光源可以与半导体激光器竞争。但是现在看起来,固体激光器即使适用也只能在有限的范围内。在波长超过 $1.0\mu\text{m}$ 的半导体激光器问世以前,曾用固体激光器作为光变换器,把AlGaAs激光器的 $0.8\mu\text{m}$ 的辐射变换成 $1.05\mu\text{m}$ 或 $1.32\mu\text{m}$ 的辐射。当作为光源时,与半导体激光器相比,其优点是单色性好,频率稳定度高。但是不能直接调制。当用别的激光器泵激时,泵激效率很低。

固体激光器用的晶体有两类:一是激活离子为替位杂质的所谓掺杂晶体,二是激活离子为晶体离子的所谓本征晶体。前者的代表是 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 。这种激光器不在光传输中应用,而主要是在激光加工中应用。后者的代表是包含激活离子 Nd^{3+} 的 $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ (缩写为LNP)和 $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ 。已经用LNP制作了小型化的稳定工作的激光器⁴⁾。图1-6画出了用半导体激光器泵激LNP激光器的系统和输出光谱。

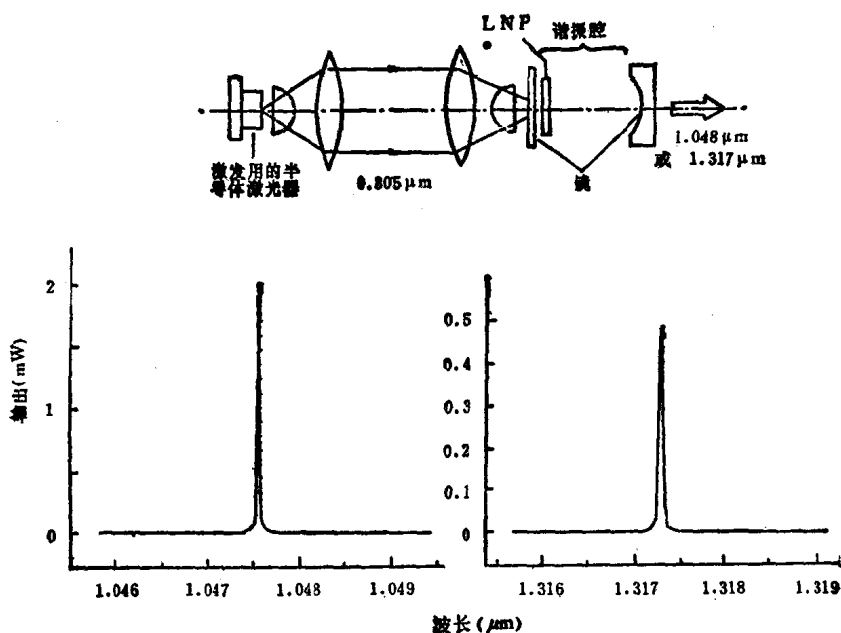


图1-6 LNP激光器的系统和输出光谱

2. 单向器件

光隔离器和光环行器等单向器件在光中继器中是必不可少的。为了获得这类器件，利用了法拉第效应的单向性。为了构成小型化的性能高的单向器件，必须选用法拉第旋转角大的光吸收损耗小的材料。YIG等旋转角大的磁性材料在 $0.8\mu\text{m}$ 附近是不透明的，即损耗太大，不能采用。因此，最好采用含稀土离子的永磁性玻璃。在光路长度为 20mm 的器件中，使光往返5次变成 20cm ，与性能高的永磁材料组合，就构成了光隔离器⁵⁾。当波长超过 $1.1\mu\text{m}$ 时，YIG变得透明，这样就得到了小

型高性能的光环行器和光隔离器⁹⁾。因为现用的光纤不是线偏振的，所以要求这些单向器件的工作不受偏振的影响，现在已经有二、三个实际的例子。

V. 器件材料的发展和今后的方向

在最近10年内，迅速改变了器件和器件材料的研究状况。1970年研究了具有电光效应的 LiTaO_3 和 LiNbO_3 等晶体的生长技术，并获得了优质晶体，这是不可缺少的光调制器的衬底材料。同时，也获得了制备高速度高效率光偏转器的 TeO_2 晶体。从那时起直到1975年，研究了透明磁性材料PLZT，光开关材料 $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ 和用这种材料制作的空間调制器。这些材料和器件均已在利用全息技术的信息存贮和信息处理系统中应用。人们在1970年就认为，光技术分为两个应用领域：一是光传输，二是广义的信息处理。为了开拓第二个应用领域，必须发展全息技术，并用全息技术进行光信息处理和存贮。光晶体、光偏转器、空间调制器等就是在这样的背景下应运而生的。但是，因为光信息存贮材料的发展不够完善，所以，这个应用领域没有取得当初预想的结果。人们对不用磁盘也能实现高速度大容量数字记忆并能改写的存贮介质材料的研究，寄予了很大的期望。但是，至今尚未达到实用的水平。最近，不能改写的激光视频圆盘(LVD)作为民用品进入了大量使用的阶段。1975年，固体激光器用的晶体的研究工作取得了进展，生长了具有优良特性的 $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ 晶体，并用这种材料制作了小型化的高效率的固体激光器，确认用这种固体激光器作为大容量光传输的光源在技术上是可行的。同年，向具有电光效应的 LiNdO_3 晶体中扩散Ti以形成光波导、光调制器、光开关等工作也活跃起来了。

一旦开始研究长波长的应用,对作为衬底材料的InP、GaSb等高质量晶体生长技术的研究就变得十分重要了。同时,也需要探索新的器件材料。可以预见,今后的发展方向是,研究由各种光器件集成的光中继器和集成光路,发展能够推动光应用技术的分隔器,以及用分隔器构成的复用中继器。还要发展利用激光磁盘记录完整图像的响应系统等。

野田健一

参 考 文 献

1. M. Horiuchi & H. Osanai: Spectral losses of low-OH-content optical fibres, *Electron. Lett.* 12, 310 (1976)
2. T. Kimura & K. Daikoku: A proposal on optical fiber transmission systems in a low-loss $1.0\sim 1.4\mu\text{m}$ Wavelength region, *Opt. & Quantum Electron.*, 9, 33 (1977)
3. K. Sugiyama & H. Saito: GaAsSb-AlGaAsSb Double Heterojunction Laser, *Jap. J. Appl. Phys.* 11, 1057 (1972)
4. K. Kubodera & K. Otsuka: Efficient $\text{LiNaP}_4\text{O}_{12}$ laser pumped with a laser diode, *Appl. Optics*, Dec. 18 (1979)
5. 関, 植木: 光ファイバ通信用 $0.8\mu\text{m}$ 帯光アイソレータ, *信学技報*, OQE 78-35 (1978)
6. A. Shibukawa, A. Katsui, H. Iwamura & S. Hayashi: Compact Optical isolator for near-infrared radiation, *Electron. Lett.* 13, 721 (1977)