

光导纤维光学

〔苏〕 B.Б.维恩别尔格 Д.К.萨特塔罗夫

于凤云 桂松范 译
祝绍箕 包学诚 校



机械工业出版社

序 言

自本书第一版问世八年来，流行的光学纤维元件已经成为数万种光学仪器和电子光学仪器中不可替代的零件，数亿种此类仪器已经应用在医院、工厂的车间、船舰、飞机和宇航中。纤维光学是否能长期生存的问题已经得到了证实，研究人员和生产者又面临着一些新的而且是通常的问题：参数的提高、成批生产、标准化、互换性、降低价格等。

但是这些平常工作并没有影响对于发展远景的试验研究。例如，远距离光通信用的光导管和梯度光纤（折射率沿截面变化的光导管）；用腐蚀法制造的高分辨率光学纤维束；能拍摄光学纤维束所传递的拼接象的结构系统；可以形成光导发光元件，光学逻辑元件和记忆元件的活性激光纤维；使玻璃纤维束的柔性提高到单根光学纤维的水平，以及聚合物（有机的）纤维光学元件；零件、部件和外型的微型化以及其它等等。解决了这些新课题，不久的将来就可以为国民经济在通信系统方面节约出亿吨铜材，还可制造出很细且有柔性并可以控制的内窥镜，用于检查肾脏、输尿管、人的关节囊肿和飞机的透平叶片以及其它等等；纤维光学逻辑装置还可以制造用其它途径无法达到的快速作用的计算机。

纤维光学正在不断地加速发展。八年来所生产的纤维光学仪器的型号数量已增加了几十倍。光导管的应用及其制造工艺的新方法和大量的创造发明，都更进一步说明了它将会以这一速度持久地发展下去。

参加本书第一版各章编写的有 Е.И.伽兰脱 (Е.И.Га-

Ⅵ

лант) (第11章), Л.С.特罗菲莫夫(Л.С.Трофимов)(第9章), К.М.弗列依维尔脱(К.М.Фрейверт)(第7章), А.Н.苏任科夫(А.Н.Сушенков)和 И.М.明科夫(И.М.Мимков) (第10章)。

感谢读者提出了宝贵意见,我们在本版中都已予采纳。

目 录

序言

导论	1
1. 纤维光学, 它的特点和发展	1
2. 纤维光学零件的类型、特点和用途	8
3. 纤维光学仪器的生产	27
4. 纤维光学的发展远景	28

第一部分 光导管的光学原理

第一章 透明光导管的光强	37
1. 光管	37
2. 单芯透明光导管的类别和决定光强的因素	39
3. 直光导管的光强	40
4. 弯曲光导管的光强	42
5. 变截面光导管的光强	45
第二章 直端面、截面不变的直光导管	48
1. 光沿直端面圆柱形光导管的传播	48
2. 透明光导管中光损失的主要原因	53
3. 光导管材料的光吸收对透射率的影响	54
4. 光从光导管侧面内反射时的损失	60
5. 光导管端面的光反射	66
6. 直端面光导管的边缘效应	70
7. 直端面单根光导管总的透射率	78
8. 空心光导管的透射率	85
9. 光导管的散射和消偏振的特性	90
第三章 斜端面光导管	101
1. 光沿斜端面光导管的传播	101
2. 斜端面光导管的透射系数的计算原理	114

3. 斜端面光导管的边缘效应	122
4. 斜端面直光导管的透射率	126
5. 斜端面光导管末端的侧面漏光	136
6. 斜端面光导管的应用	137
第四章 弯曲光导管	144
1. 光沿弯曲光导管的传播	144
2. 弯曲光导管中的光程长和反射次数	155
3. 弯曲光导管中光线的散射	157
第五章 变截面直光导管	164
1. 光沿变截面光导管的传播	164
2. 聚光管的透射率	172
3. 聚光管在会聚太阳辐射方面的应用	174
4. 变截面直光导管中子午光线的散射	180
5. 截面均匀变化的光导管	184
第六章 梯度纤维光导管	192
1. 光沿梯度光纤的传播规律	193
2. R -梯度光纤光学特性的实验研究	201
第二部分 光导束的光学原理	
第七章 光通过透明光导束的传播	208
1. 光导束传播的主要辐射分量	208
2. 光导束传播的辐射分量的信息特性	216
3. 通过光导束传播的主要辐射分量的光谱特性	228
4. 光通过透明光导束的横向分布	233
第八章 纤维零件的拼接	242
1. 纤维光学零件的分辨率	242
2. 纤维零件的对接	246
3. 纤维零件拼接明显度的减小	248
第九章 纤维零件的特性参数测定	264
1. 分辨率的测定	264

IV

2. 纤维元件的频率反差特性266
3. 透明光导管的光束透射率270
4. 透明光导束出射端的光分布特性曲线286

第十章 导光层光学294

1. 光沿层状光导管的传播294
2. 层状零件的象散298
3. 层状导光零件的分束作用302
4. 已知光线族的分束方法305
5. 不改变光线方向的系统310
6. 导光层的弯曲313
7. 导光层的扭转315
8. 象的形成319
9. 导光楔322
10. 层状透镜和楔形透镜的成象质量328
11. 复制物镜.....329
12. 同心层状物镜.....334
13. 导光层光学的应用前景.....340

第三部分 纤维光学元件的制造

第十一章 纤维光学元件的制造原理..... 344

1. 纤维光学元件的结构344
2. 压制用的纤维材料的制造350
3. 制造用于电子光学仪器的纤维光学圆盘359
4. 强光光导管的制造363
5. 玻璃耐强辐射的稳定性370

第十二章 对纤维光学零件玻璃的基本要求.....375

1. 对纤维光学零件玻璃光学参数的要求375
2. 对纤维光学零件玻璃的物理化学性能要求379

附录385

参考文献389

导 论

纤维光学是研究光学波段内的电磁辐射在实心和空心光导管、射线导管和波导管中的传播以及导光纤束所成象的转移、变换和形成的一个光学分支。纤维光学包括：与这些过程有关的定律的研究；纤维光学元件的性能研究和参数评定的方法；还有纤维元件的制造过程及其在技术、科学和仪器制造中的应用。

1. 纤维光学，它的特点和发展

在上个世纪末，契科列夫 (В.Н. Чиколев) 提出了光沿着镜管传递的可能性，廷达尔 (Тиндал)、伍德 (Вуд) 等人指出了光能够沿水流和玻璃棒传递。但是，沿很细的光导纤维束传象的最初的文献则是拉姆 (Ламм) 在 1930 年才发表的。由于利用了纤维光学零件，使光学系统具有新颖的品质。有关这方面的实用消息直到五十年代才有报导。美国在这些年代里，开展了关于纤维光学的研究工作。卡帕尼 (Капань)、齐格蒙德 (Зигмунд)、斯尼特采尔 (Снитцер)、库尔特涅依-普拉特 (Куртней-Прагг)、卡皮利亚罗 (Капиляро)、哈依德 (Хаид)、波捷尔 (Поттер)、科斯特尔 (Костер)、霍普金斯 (Хопкинс)、希克斯 (Хикс) 等人的著作起着重要的作用。其中一部分重要文章已列入本书的参考文献中。

作者在 1958 年开始对纤维光学进行探索研究^[16, 17]，稍后，全苏玻璃板和玻璃纤维科学研究所、格鲁吉亚联邦共和国科学院和控制学研究所也开始了这方面的工作。目前，在苏

联已有上千个研究、设计部门和工矿企业从事这一课题的研究。

直到六十年代末，纤维光学才逐渐被人们所认识，并被公认为光学的一个组成部分。在大量早已知道的光学零件（反射镜、棱镜、透镜、滤光镜、分光镜、偏光镜、衍射光栅等）中，又增加了光导管。光导管是由许多光导纤维组成的光导纤维束，有柔性和刚性两种。光导纤维可以按规律排列或交错编织，其截面可以是恒定的或沿长度方向变化的。此外，还有梯度光导管、微通道板以及光导发光元件等。光学纤维零件的种类是各种各样的。借助于上述各种零件，可以提供新的方法来解决光学机械工业和电子光学工业所面临的大量课题，也可以用于解决近距离和远距离光通信方面的问题。

射至透明光导纤维入射端面上的光线，由于全内反射而沿着光导纤维传播，然后从另一个端面射出。为了减小内反射时的光损耗，光导管由高折射率 n_0 的导光纤维芯和周围的低折射率 n_1 的绝缘包层组成。在这种光导纤维中，纤维芯和包层界面上的光损耗是很小的，甚至经过几千次反射也是如此。

几何光学定律对于直径 D 。超过 $5 \sim 6$ 微米的光导管和光学纤维[⊖]来说是正确的。对于更细一些的光学纤维，就呈现光的衍射现象，它们也可作为光学的波导管，这时一部分能量可能穿过光学纤维的侧面而损耗。但是，甚至当光学纤维直径为十分之一微米时，某些波导模（波的型式）还是能沿着它们传输的。利用波导模沿聚光纤维传播的特性可以说明人眼的色觉机理^[109]。

⊖ 直径小于0.3毫米的光导管称为光学纤维。

带有防光包层的光学纤维，平行地敷设成光导束，加以粘结后，形成多芯光导管。投影在这种光导管一个端面上的象，可以被传递到它的出射端面上。

紧密粘结多芯光学纤维束形成的纤维块，可以被切成真空密实的导光板，象将从导光板的一个表面传递到另一个表面。这些导光板装有框套，以便焊接在电子射线仪器的玻壳上（图1）。

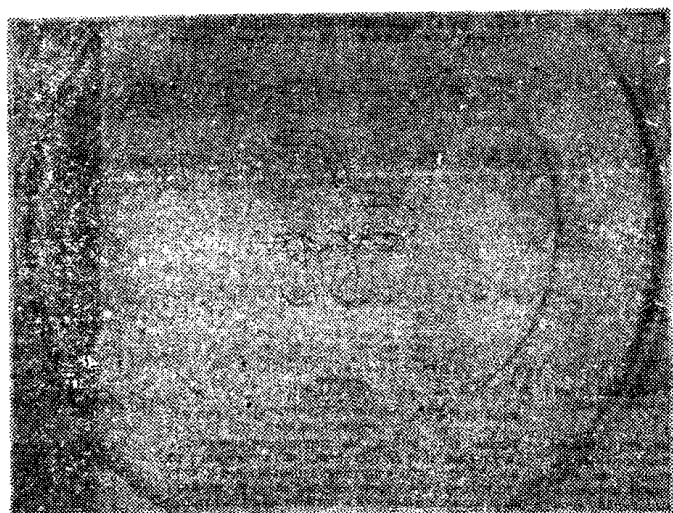


图1 带有框套的光学纤维圆盘：圆盘直径150毫米，厚度10毫米，纤维芯材料—玻璃 $\Phi 25$ ，薄层和框套的材料—K17，导光纤维芯的直径 $5\sim 7$ 微米，填充系数0.7，分辨率 70毫米^{-1}

用热压法把粘结好的纤维块制成聚光纤维，这种聚光纤维是由截面积逐渐缩小的纤维组成，当象从它的一端传递到另一端时，可以使象缩小或放大。

将加热的纤维块的一端进行单向压制，就可以得到光学

纤维的变形元件，它可使被传递的象仅在一个方向缩小或者放大。在某些情况下，这些零件可以代替柱面透镜或反射镜系统（图2）。

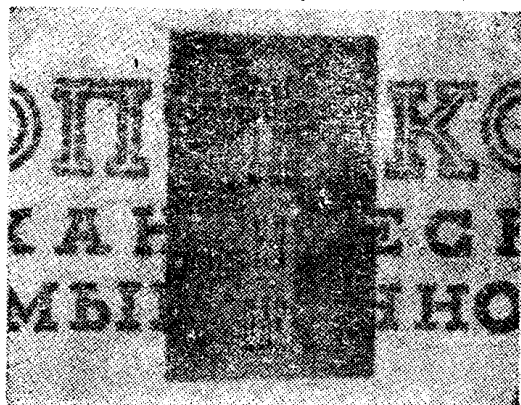


图2 利用光学纤维变形元件传象

把规则分布的细微光学纤维束的端头相粘结可使这种光学纤维束的柔性很好。弯曲这种光学纤维束不会影响它的传象。

利用按规定要求改变光学纤维在出射端上的分布，可由光学纤维制成象变换器：将一个画面转换成一行或数行；将长条纹的一段收缩转换成正方形；将直行转换成一个环（图3）等。

光学纤维零件与玻璃（各向同性材料）和晶体（各向异性材料）不同，它具有蜂窝结构（见本书图11.3），并且导光的纤维芯是平行地或严格地按规定的曲线分布于空间。此外，光学纤维束应是柔软的，而对于普通材料则不用提出这样的要求。纤维光学零件的种类非常多，按其用途可分为：用于光学显微穿刺活细胞核的极细的尖针^[56]；用于医学和工业

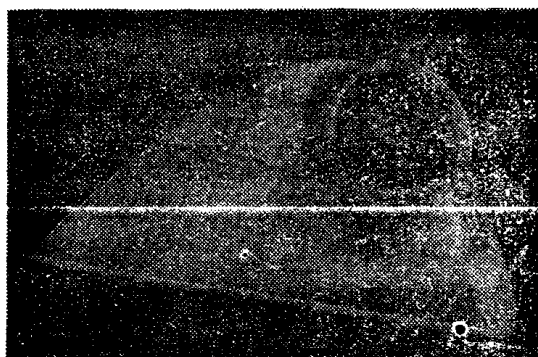


图3 环转换成行的纤维变换器，它由粘结的光学纤维制成：行长150毫米，一行内传递的象素数目为12000

内窥镜的柔性光导纤维束；用于接触式荧光显微术的刚性光导管；用于电子射线仪器的前置真空密实玻璃；校正透镜式和反射镜式物镜成象的场曲和畸变以及提高光强的聚光透镜；用于高速摄影^[20, 30, 96, 102]、遥测技术和无线电传真、电视等的各种扫描变换器；光学纤维复杂交织的密码变换器和计算机的逻辑元件、激光器^[42, 45, 63, 96, 108]以及鉴别规定声频谱的光声元件——光致发声元件等等。

近年来，制成了能替代通信系统电缆网的高透射率光导管，即折射率从轴线逐渐均匀地向边缘减小的梯度光导管，它可用作潜望镜的物镜和转象系统，以及用作为轻便的象亮度倍增器的微通道板。

为了制造上述这些导光零件，就需采用各种不同的玻璃，对这些玻璃，除了纯光学要求外，还提出了一些新的特殊的要求，如膨胀系数，粘度的温度变化，一致性（内部结构在加热成型过程中没有受破坏），化学惰性等。

光学纤维零件在分辨率，光强，透射率和很多其它性能

方面已经非常理想，因而被应用于各种光学和电子光学仪器中。

现在，关于新型光学纤维零件的生产及其质量提高方面的报导逐年增多。

在各种国际展览会和全苏国民经济成就展览会上，展出了纤维光学零件和各种仪器。国外有三百多家公司从事这些产品的生产，其中美国——140家；英国——45家；联邦德国——40家；日本——26家；法国——20家；民主德国——10家；瑞典、比利时、意大利、荷兰、瑞士、奥地利、加拿大、澳大利亚——一共22家。这些公司中最大的一些已列于附录中。根据公司名称及其产品目录，显而易见，其中20多家公司专业生产各种纤维光学元件和应用这些元件的仪器。

纤维光学的发展速度可从增长的文献数量中间接地反映出来（图4）。有关纤维光学的书籍、文章、专利、样本、

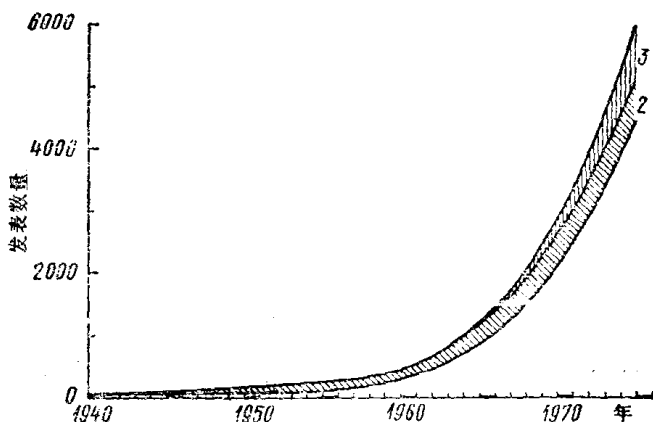


图4 纤维光学方面文献发表总数的增长

1—书和文章 2—创造发明 3—标准、说明书、样本、价目表

说明书、标准及其它一些出版物的总数已经超过7000种[⊖]，其中苏联出版的书籍和文章约占45%，发明则占30%以上。如果在四十年代和五十年代发明占比较重要的地位，那么目前发表的75%是书和文章，而发明则为10%。重要的不单是纤维光学方面著作的总数增加了，而且文献发表数量的增长速度也很快。实际上，近15年来，每年发表的总数相对于前一年的总数增加12%。这个数值比所有其它学科文献数量的平均年增长率高一倍。

纤维光学产品最早的商品目录、说明书和价目表也是在十年前才有的，而现在它们的数量约为800种（占出版总数的11%）。这些出版物的年增长率约为30%。其中也包括了工业生产的产品的主要技术和经济指标。

近年来，在光导纤维特性的应用方面出现了一些新的概念：信息相对于光学纤维横向分布；光学纤维的互相作用（能量能从一根光学纤维传至邻近的一根光学纤维中，即隧道效应）[34, 96]；在激活纤维中辐射激发智能传输逻辑元件的可能性[42, 96, 100, 108]；应用全息方法提高所传递信息的容量；在晶体纤维系统中有效地实现电子激发光。建议采用一种光学纤维零件[⊖]，这种光学纤维的导光纤维芯之间不用另一种玻璃作为光绝缘层。很多研究人员正在从事着大功率激光聚束（自聚焦）的研究工作，即在均匀介质中产生瞬时的导光通道。新型导光技术——薄膜光学已初具规模，其应用范围和结构形式大大地超过纤维光学，而它的成象规律与经

⊖ 该数据是作者根据以往的统计数字，并与其它一些统计数字相比较，根据不完全系数而得出的。近年来，由于专利和其它情报资料收集得不够全面，此数据是粗略的。

⊖ 发明证书№233247。

典光学毫不相似。

2. 纤维光学零件的类型、特点和用途

表 1 列出了各种类型纤维光学零件的一些数据, 这些数据是根据苏联和 500 家外国公司的产品目录分析编纂而成的。

表 1 已生产的纤维光学零件类型

零 件 类 型	外型尺寸数目	生产单位数目
光学纤维		
玻璃光学纤维	33	13
有机光学纤维	10	4
透紫外光学纤维	2	2
透红外光学纤维	5	2
远距离通信用光学纤维	13	18
激活(激光)光学纤维	2	3
单芯光导管		
玻璃单芯光导管	59	15
石英单芯光导管	14	5
多芯光导管	18	5
纤维束		
照明纤维束	2211	14
调节用纤维束	227	6
形状变换器	13	5
分流器	37	5
纤维板	37	2
纤维透镜	13	4
聚光纤维	13	6
变形元件	1	1
梯度纤维(自聚焦纤维)	7	5
微通道板	17	6

透射系数 τ 和名义数值孔径 A_0 是纤维零件的主要技术指标。典型纤维光学零件产品的这些参数值列于表 2。由于产品的结构和制造工艺不同,透射率的变化范围较大。

表 2 当光线倾斜很小角度时,光导管
在可见光谱区域中的透射系数 τ

光导管的型式	直 径 D (毫米)		A_0	长度为 d_0 (米) 时的 τ			
	总直径	芯直径		0.1	0.3	1	3
带透明包层的单芯玻璃棒	0.3~25	0.3~25	0.54~0.84	0.83~0.88	0.79~0.85	0.60~0.79	0.27~0.65
多芯玻璃棒	0.3~3.5	0.004~0.1	0.54~0.84	0.58~0.81	0.48~0.74	0.20~0.52	—
玻璃光学纤维	0.01~0.2	0.01~0.2	0.5~0.8	0.74~0.79	0.70~0.77	0.60~0.71	0.38~0.58
玻璃纤维束	1~20	0.01~0.2	0.5~0.8	0.37~0.70	0.33~0.66	0.20~0.56	0.09~0.35
聚合纤维束	1~8	0.2~0.5	0.5	0.69~0.75	0.60~0.70	0.40~0.60	0.15~0.40
远距离通信的光学纤维	0.08~0.15	0.07~0.14	0.05~0.20	0.94	0.94	0.94	0.94

光导管 光导管由 TK, БФ, Ф, ТФ, СТК, СТФ 等普通牌号的纯净光学玻璃制成,光导管置于由 ЛК, К 等牌号玻璃制成的包层内,直径为 0.3~20 毫米。由于内反射损失很小(通常一次反射的损失在 0.00001~0.000001 范围内),光导管中光束总共反射几十次至数百次,所以光减弱的原因仅仅是由于材料的吸收和端面的菲涅耳反射。提高光导管透射率的主要途径是使配料更纯,生产更文明。

根据玻璃的牌号和质量,光导管能够经受 5~15 兆瓦/米² 阳光的持续照射,而许多牌号玻璃即使在很强的辐照下也不破坏。在脉冲持续时间约 1 微秒的激光辐照下,玻璃光导管的能量密度可保持在 1~3 焦·毫米⁻²[24]。这相当于脉

冲辐照大于光导管所受到的太阳持续照射的 200 倍。

在冷态下，光导管在弹性范围内能够弯曲到曲率半径为其直径的 200~300 倍。在热态下，光导管在满足其数值孔径不能有显著减小的条件时，可以弯曲到曲率半径等于其直径的 20~50 倍。

由于光导管的稳定性和高透射率，它可以广泛地用于传送光通量很大的光，使到达难以达到的内腔中。这种光导管与能进入内腔的小型电灯泡相比，它的最大优点是可以在同样外形尺寸下送入多好几倍的光通量，而在内腔产生的热量却是小型电灯泡的几十分之一。实际上，电灯泡所消耗的功率主要变成了热量，仅很小的一部分变成了红外辐射，还有很小的功率变成了可见光。在应用这种光导管时，射入内腔的仅是可见光，灯泡本身的热量和红外线则没有进入内腔，因此沿光导管传到内腔的光可确切地称为“冷光”。刚性光导管的冷光系统应用于数千种医学和工业内窥镜以及照明装置中^[108]。这种光导管还可用于照明夜视仪器的度盘、光信号盘；在发光计数器中，连接晶体与光电倍增管，能使光电倍增管避免接收强辐射区域。在后一种情况下采用有机玻璃的光导管也是很有成效的^[96]。

为了得到细长管子内表面的照相或静电摄影的象，建议采用长的直光导管[⊖]。光从外光源沿光导管射到管子的内部。锐锥形的光束从回转反射镜反射出来，沿螺旋线描绘管子的内表面。管子中的反射信号也沿光导管射出，由光电倍增管接收，经过放大后，送到带有纤维前置玻璃的显象管上。扫描一行相当于扫描头回转一周。管子表面逐行地成象于紧贴在显象管的照相纸上。照相纸匀速移动，其速度与所研究的管

⊖ 发明证书 №131922。

子的纵向运动速度相一致。计算表明,用这种方法在半小时内可以得到长6米、直径4.5毫米的管子整个内表面的照片。在这种照片上,将以 60毫米^{-1} 的空间频率分辨出管子的毛病。管子内表面的象将放大13倍^[30]。

光导管也能用于将位置靠得很近的元素分送到各个接收器中,例如摄谱仪中的谱线、跟踪系统中的扫描区、编码信息的计数等。

弯曲的光导管可以组成带有包角近似于球形的聚光镜。为了使光线在出射端更加集中,光导管的入射端和出射端最好制成凸形的(图5)。图上的聚光镜分为二半片,是为了便于安放灯泡; r_1 和 r_2 是由光导管的凸面所形成的球面的半径。凸端的焦距分别等于 r_1 和 r_2 。

由于光导管具有较强的耐辐射性,所以可用作显微光度探针,用于研究太阳炉和热辐射转换器焦点区域的光场^[18, 23]。

由于紫外线在较厚的玻璃中的透过率很低,因此在照相和电影内窥镜中,由于它们对成象的光学性能要求较高,所以应采用石英光导管。通常其直径为3~5毫米,并且制造时不用包层,只需涂上一层金属反射包层即可。

名义数值孔径 $A_0 = \sin u_0 = (n_0^2 - n_u^2)^{0.5}$,等于无渐晕地沿光导管通过的光线的最大倾角 u_0 的正弦,它与光导管的折射率 n_0 及其绝缘层的折射率 n_u 有关。测量液体折射率的折射计就是根据这个原理设计的。用标准玻璃制成的无包层光导管浸入被研究的液体中,用这方法测量大孔径光束的透射系数。液体和光导管的折射率越接近,则其透射系数就越小。

刚性多芯玻璃光导管 多芯光导管制成直径为0.3~3