



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

本科生毕业设计（论文）

题 目：介电弹性体驱动的柔性可变焦菲涅尔
透镜研究

姓 名：张慕禹

学 号：11910523

系 别：力学与航空航天工程系

专 业：理论与应用力学

指导教师：杨灿辉

2023 年 5 月 29 日

诚信承诺书

1. 本人郑重承诺所呈交的毕业设计（论文），是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，所有数据、图片资料均真实可靠。

2. 除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本论文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确的方式标明。

3. 本人承诺在毕业论文（设计）选题和研究内容过程中没有抄袭他人研究成果和伪造相关数据等行为。

4. 在毕业论文（设计）中对侵犯任何方面知识产权的行为，由本人承担相应的法律责任。

作者签名：张慕禹

2023 年 5 月 29 日

介电弹性体驱动的柔性可变焦菲涅尔透镜研究

张慕禹

(力学与航空航天工程系 指导教师：杨灿辉)

[摘要]：菲涅尔透镜是一种由一组同心圆环镜片组成的复合紧凑型镜片；与普通透镜相比，具有节省空间和透镜材料以及较小的相差等优势。然而，传统的菲涅尔透镜由硬质材料组成，难以发生变形，因此无法单独实现轴向变焦。鉴于此，本论文开发了一种基于介电弹性体驱动的可变焦菲涅尔透镜。首先设计了一种低模量、高度可拉伸、高透明且可导电的聚电解质弹性体，制备成菲涅尔透镜；然后将其用作介电弹性体驱动器的电极。通过施加电压，在介电弹性体薄膜两侧施加麦克斯韦应力，在厚度方向上压缩介电弹性体薄膜，同时在面内方向上拉伸介电弹性体薄膜。介电弹性体的变形带动柔性菲涅尔透镜的径向拉伸，改变菲涅尔透镜表面的曲率，从而实现焦距的变化。本文使用倒模的工艺制备柔性菲涅尔透镜，制备流程简易，制得的柔性菲涅尔透镜具有较好的表面质量；基于介电弹性体驱动的柔性可变焦菲涅尔透镜在 9 kV 的电压的作用下可实现 28% 的焦距变化。柔性可变焦菲涅尔透镜在太阳能收集、激光聚焦等方面有广泛的应用前景，为这些光学应用提供了新的解决方案。

[关键词]：菲涅尔透镜；介电弹性体驱动器；聚电解质弹性体；
柔性；可变焦

[ABSTRACT]: Fresnel lens is a type of composite compact lens by dividing the lens into a set of concentric annular sections. Compared to traditional lenses, Fresnel lens is advantageous in terms of compactness, materials saving, and smaller phase difference. However, conventional Fresnel lens are made of hard materials and are difficult to achieve axial focal length change. In this regard, current thesis develops a soft and tunable Fresnel lens based on dielectric elastomer actuator (DEA). An ionically conductive polyelectrolyte elastomer with low modulus, high stretchability, and high transmittance is synthesized into the shape of Fresnel lens and used as one of the electrodes in an DEA. When a voltage is applied, charges of opposite polarities accumulate on the two surfaces of the dielectric elastomer, generating Maxwell stress to compress its thickness and expand its area. The areal expansion of dielectric elastomer stretches the soft Fresnel lens radially to alter the curvature of the Fresnel lens' surface, resulting in the change of the focal length. The soft Fresnel lens is prepared by the inverted mold method. The fabrication process is facile and the obtained lens possesses fine surface qualities. A focal length change of 28% has been achieved under the applied voltage of 9

kV. Soft and tunable Fresnel lens paves new avenues for diverse optical applications where space and cost are at a prime, such as field solar energy collection and micro-laser focusing.

[Keywords]: Fresnel lens; dielectric elastomer actuator; polyelectrolyte elastomer; softness; tunable focus

目录

1. 绪论	2
1.1 课题背景及研究意义	2
1.2 国内外研究现状	4
2. 工作原理及结构设计.....	7
2.1 介电弹性体驱动器原理	7
2.2 菲涅尔透镜结构及其原理	7
2.3 电驱动可变焦菲涅尔透镜原理	8
3. 聚电解质弹性体制备与表征	10
4. 柔性可变焦菲涅尔透镜的制备	15
4.1 透镜材料的制备	15
4.2 透镜装置的制备	16
5. 透镜性能表征	18
6. 结论与展望	21
参考文献.....	26
致谢	26

1. 绪论

1.1 课题背景及研究意义

传统光学透镜是通过控制透镜表面曲率半径从而实现控制透镜焦距。相比于传统球凸透镜，菲涅尔透镜是将球凸透镜划分为一系列具有相同曲率半径的同心圆纹路，从而实现相同的光学效果，同时达到做薄镜片、节省材料的效果。菲涅尔透镜凭借其重量轻、成本低等优点，已经广泛的被应用于太阳能收集、照明以及成像等领域^[1-7]。

在对光学器件有需求的场景，往往需要可调焦距的镜头。传统的机械式菲涅尔镜头调焦通过电机的刚体平移来改变镜头平面，这使得镜头体积大、重量重、速度慢。尤其是在诸如太阳能收集（如图 1）、激光聚焦等用到菲涅尔透镜的场景，往往需要聚焦更多的能量，因此使用的菲涅尔透镜口径大。尽管菲涅尔透镜具有镜片薄节省材料的效果，但当面积在数个平方米甚至更大时，菲涅尔透镜的重量也更大，这使得通过传统的机械式菲涅尔镜头调焦更难实现。

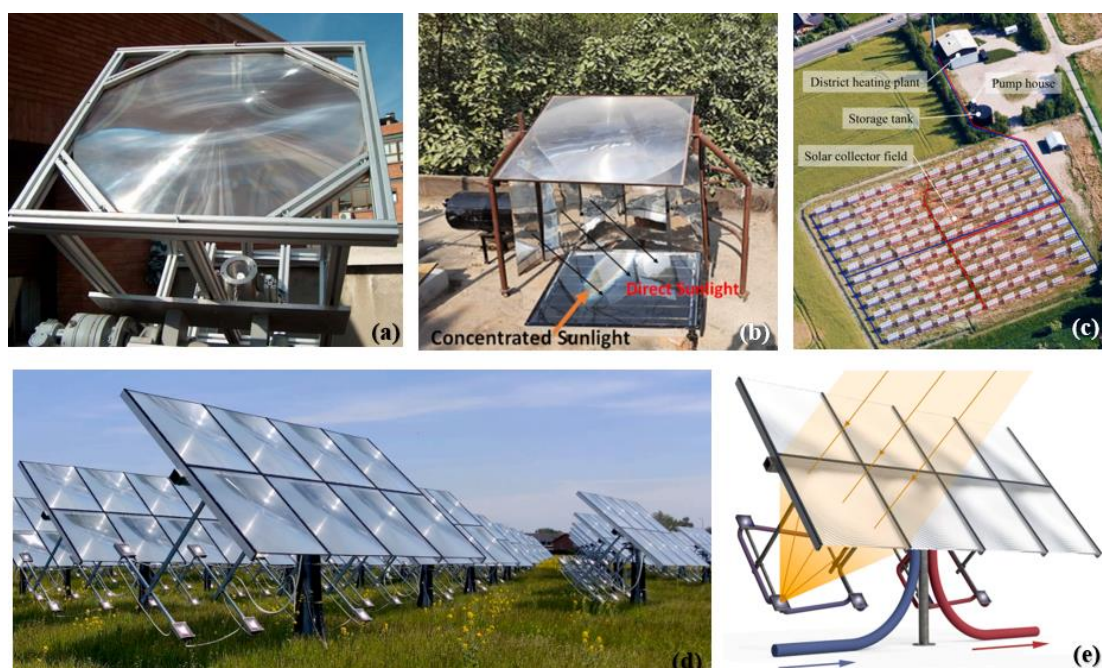


图 1 (a)、(b) 图为真实菲涅尔透镜图片^[8, 9]；(c) 图为丹麦伦德马克太阳能聚光收集器场和区域供热的鸟瞰图，彩色线条表示管道网络；(d)图为丹麦伦德马克的菲涅尔透镜太阳能

收集器在运行中的照片，接收盒中的白点是透镜的焦点；(e)图为菲涅尔太阳能收集器示意图，菲涅耳透镜槽为可视化而增强。^[10]

菲涅尔太阳能收集器可以通过将太阳能聚集后再用太阳能板收集从而大大减少所需太阳能板面积，由此可以大大降低使用太阳能的成本。根据 Adam R. Jensen^[10]、Nair M^[11]等人的研究，如图 1 中的菲涅尔太阳能收集器都具有一个缺陷，即日间收集太阳能的功率受时间影响较大，每天只有在中午的两小时菲涅尔太阳能收集器能以较高的功率工作，其余时间其功率会衰减一半以上。这是由于随着时间变化太阳光相对于菲涅尔透镜所在平面的夹角发生变化。根据浙江大学的张兰等人的研究^[12]，将出现最亮最小的光斑的位置认为时焦点位置，随着入射菲涅尔透镜的平行光角度改变，焦点位置的变化如图 2 所示。当入射光角度发生变化时，菲涅尔透镜不会像普通凸透镜一样焦点恒位于焦平面上，因此当入射光角度发生变化，无法将所有菲涅尔透镜收集的光线聚焦在太阳能收集板上。

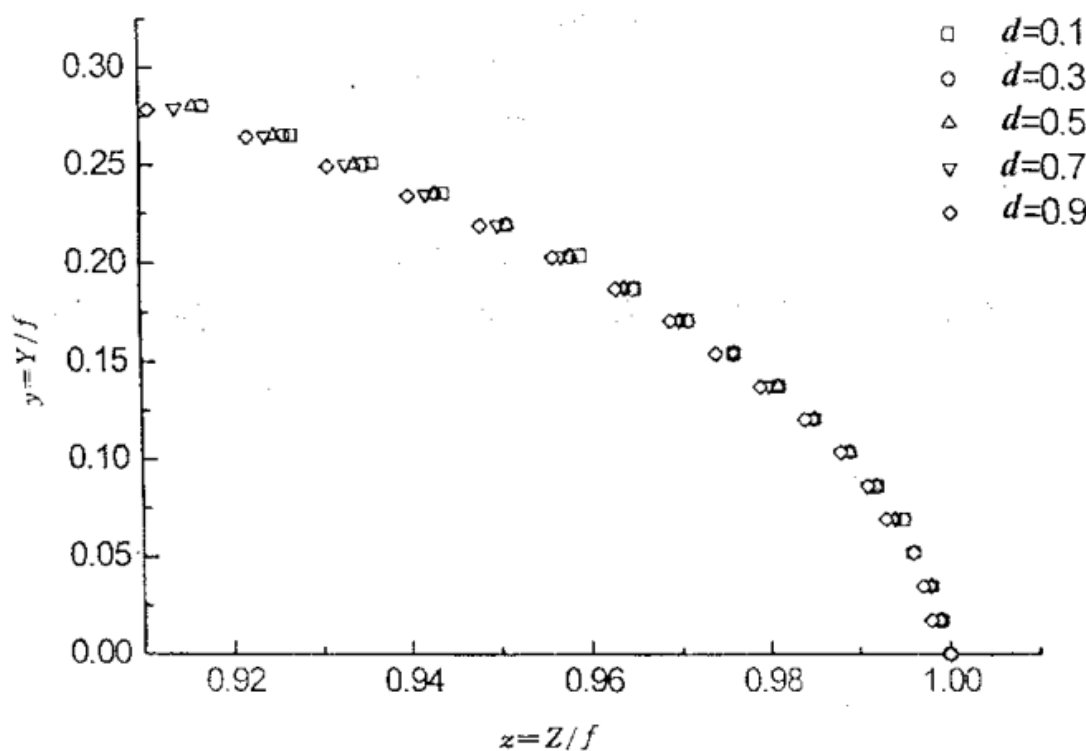


图 2 各种角度、各种相对孔径 d ($d=D/f$) 下的焦点轨迹，其中 f 为平行光平行于菲涅尔轴线入射时的焦距， D 为菲涅尔透镜的直径，设菲涅尔透镜的中心为坐标原点，沿菲涅尔透镜轴线方向为 z 轴，沿菲涅尔透镜径向方向为 y 轴， Y 、 Z 为不同入射光角度下焦点实际位置的坐标， y 、 z 为对其进行归一化处理后相对坐标^[12]

倘若可以实现菲涅尔透镜的轴向变焦,则可通过一些光路设计,使得在不同入射光角度下,菲涅尔太阳能收集器都能以高功率运行,大大提高产能。但是如图 1 所展示,菲涅尔透镜口径往往过于庞大,且其太阳能接收板需连接循环管道,无论是移动菲涅尔透镜还是移动其太阳能接收板需要的成本过高,可行性低。而介电弹性体驱动可变焦柔性透镜由于其成本低、能耗小、制作便捷等优势,在此场景下非常适用。介电弹性体驱动装置是一种力电耦合的装置,通过施加外加电场而产生机械驱动,常使用三明治结构,由一层具介电弹性体薄膜和在介电弹性体薄膜两侧粘贴的柔性电极组成。由于介电弹性体薄膜的弹性模量远远小于其体积模量,近似认为其为不可压缩固体,当在外部电压载荷施加到电极上时,由于麦克斯韦应力的作用,介电材料被挤压,厚度方向上发生变形,并导致了面内面积应变。

本文基于介电弹性体驱动装置的原理,对柔性菲涅尔透镜的制备流程以及材料等方面展开了研究,并且对其表面质量、变焦能力进行了表征,充分展现了本课题在可变焦菲涅尔透镜领域的潜在价值。

1.2 国内外研究现状

近年来,非机械可变焦镜头越来越受到人们的关注,可变焦透镜在诸如:光通信、光测量系统以及自适应光学系统等诸多领域有着应用需求^[13],近年来许多研究都设计了许多令人眼前一亮的可变焦透镜,根据其工作原理、工作介质进行分类,这些可变焦透镜大致上可以被归纳为:液晶透镜、液体透镜和固体透镜^[14]。

液晶,是一种介于晶体和液体之间的物质状态,具有部分晶体的有序性和液体的流动性,是由长链分子组成的聚合物。当对液晶材料施加电压时,液晶分子的排列方向会发生改变,从而实现对其光学性能的改变,进而通过设计可以实现对其焦距的改变。1979 年 Sato^[15]就设计了一款基于液晶材料的可变焦透镜,随着施加电压改变,液晶分子的排列方向发生改变,最终实现透镜的焦距变化。Afsoon^[16]等人基于液晶透镜的设计原理,设计了一款二相的菲涅尔透镜,这种透镜利用光干涉的原理,实现聚焦的功能,但其并无法还原菲涅尔透镜火焰装的

微结构形状。由于液晶的特性，这种可变焦透镜由于特殊的液晶分子取向对不同偏振光的吸收率、折射率等光学特性不同，在遇到不同偏射光时往往存在较大成像问题；此外液晶材料容易受环境影响，在不同温度下液晶的光学性质也会发生改变，或者在一些本身存在的电场环境下，对其成像影响较大。

液体透镜主要是通过改变透镜形状从而实现焦距改变的目标，2000 年 Berge 和 Peseux 等人^[17]便设计了基于电浸润原理的可调焦透镜，这种透镜通过改变施加电场，从而实现改变液体表面张力，实现对焦距变化。2003 年 Zhang 团队^[18]就设计了一款通过外加液泵进而改变液体透镜表面曲率，从而实现焦距改变。SONY 公司的 Takai 等人就基于电润湿效应提出了一种液体透镜组成的微透镜阵列^[19]，这种微透镜阵列可以实现与普通菲涅尔透镜达到同的功能。基于相同的原理 WANG Xin 等人也设计了一款焦距变化范围为-52~73 mm 的液体菲涅尔透镜^[20]，这种设计还原了菲涅尔透镜火焰状的微结构，但由于其复杂的结构设计，他们的设计中仅制作了具有两个环带的火焰状菲涅尔透镜，为了实现较大的变焦范围，他们的设计不得不将透镜本身设计的过于厚且他们设计的液体菲涅尔透镜并没有还原菲涅尔透镜薄的优势。液体透镜具有响应快的优势在生物医学成像领域有着广泛的应用，但这种液体透镜需要封装在密闭环境中，存在着泄露的风险，而且由于其介质为液体，当发生振动时，容易出现光轴的振动与偏转。由液体作为介质的可变焦菲涅尔透镜是通过改变液体的浸润角，为了使浸润角有较大改变空间，不得不将透镜做的较为厚，这样便丧失了菲涅尔透镜本身的节省空间和材料的优势，并且这种液体菲涅尔透镜结构设计复杂，难以实现制备大口径的透镜。

全固体可变焦透镜主要有基于机械式驱动的柔性可变焦透镜和基于介电弹性体驱动装置的柔性可变焦透镜。Xinglong Ma^[21]团队就报道过对线形光斑可变焦菲涅尔透镜聚焦性能研究，但其研究是机械式驱动的可变焦透镜，这种驱动方式响应慢、噪音大、重量重，此外他们的研究中使用的线状菲涅尔透镜为仅具有三条条带线形光斑的柔性菲涅尔透镜，厚度十分厚，并不具备菲涅尔透镜应该具备的优势，无法提供柔性菲涅尔透镜制备方法的指导。自 Pelrine 提出了介电弹性体驱动装置后^[22]，Baohong Chen、Sijun Liu、Zihang Peng、Hao Zhong^[23-26]

等人都基于介电弹性体驱动装置设计了性能优异的可变焦凸透镜,这种凸透镜具备着响应快、结构轻等优势,而且由于是全固体材料组成的透镜,因此不存在泄露的风险,与液晶透镜相比,这种全固体的透镜相差更小,具有较好的应用前景。2017 年 SUNTAK PARK 等人便基于这种介电弹性体驱动装置设计了一款二元相的可变焦菲涅尔透镜,这种二元相的菲涅尔透镜仅仅可以模拟其聚焦的能力,但由于不具备菲涅尔透镜火焰状的微结构,而丧失了部分菲涅尔透镜本身具有的优势。且由于他们使用的材料弹性模量较大,最终可以实现的焦距变化较小,最大仅为实现 17%左右的焦距缩短^[27],而且他们提出的可变焦菲涅尔透镜制备方法用到了刻蚀法,制备工艺复杂且昂贵。

基于现有研究,本文从材料以及制备流程等方面展开了研究,通过合成制备了一种低模量、高度可拉伸、高透明且导电的聚电解质弹性体作为介电弹性体驱动装置上的柔性电极。并且设计出了一套针对该材料适用且对一些其他聚电解质弹性体也适用的柔性菲涅尔透镜制备流程,对制备流程中一些具体问题诸如提升表面质量、防止柔性菲涅尔透镜表面出现褶皱等问题进行了详细的研究,该流程使用倒模的方法制备柔性菲涅尔透镜,该制备流程简易,用到的材料易获得,制得的柔性菲涅尔透镜具有较好的表面质量,该介电弹性体驱动的柔性可变焦菲涅尔透镜在电压的作用下可实现 28%以上的焦距变化。

2. 工作原理及结构设计

2.1 介电弹性体驱动原理

如图 3 所示，介电弹性体驱动装置是由中间一层介电弹性体膜与上下两层柔性电极组成，通常认为介电弹性体是不可压缩的，因为其泊松比非常接近 0.5，体积模量 K 远大于其弹性模量 Y ，当在某一个方向上施加一个压应力，则材料会在该方向上被压缩同时在其余方向上会被拉伸，用 Pelrine 提出的静电模型^[28]在厚度方向上压缩薄膜的压应力：

$$P = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \quad (1)$$

式中 P 为在厚度方向上压缩薄膜的压应力， ε 为材料的相对介电常数， ε_0 是自由空间的介电常数为 $8.85 \times 10^{-12} F/m$ ， E 为电场强度 (V/m)。当薄膜在厚度方向上被压缩，径向上则会被拉伸，这两个形变是耦合的同时发生的，而当我们的柔性电极与介电弹性体薄膜粘接紧密时，介电弹性体薄膜径向上的伸长同时会带动柔性电极发生径向上的形变，将电能转化为机械能，实现驱动柔性电极运动。

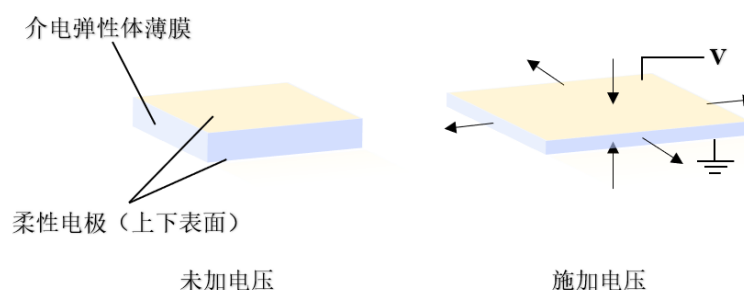


图 3 介电弹性体驱动装置示意图

2.2 菲涅尔透镜结构及其原理

一般的凸透镜在光线通过时，仅在透镜与外界的界面处发生折射起到对光路弯折的作用，法国物理学家 Augustin-Jean Fresnel 便提出了一种设计如图 4 所示，将普通的凸透镜划分为一个个环带，去除图中红色部分的材料，只保留会发生折射的部分，则可以做成非常轻薄，且能与普通透镜具有相同焦距的菲涅尔透镜。

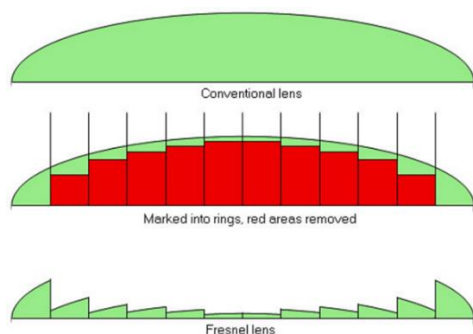


图 4 (a)

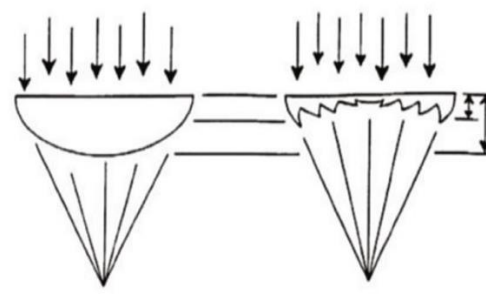


图 4 (b)

图 4 其中 a 图为菲涅尔透镜设计示意图 b 图为菲涅尔透镜光路示意图

菲涅尔透镜可以认为是由许多同心棱镜圆环排列组合而成，每个圆环划分的越细则可以做成越薄的菲涅尔透镜，相较于传统透镜，可以设计出具有更大口径的菲涅尔透镜，同时菲涅尔透镜的镜片更薄，因此菲涅尔透镜可以传递更多的光，也具有更小的相差，基于这些优点，菲涅尔透镜被广泛用于投影、太阳能收集等领域 [29、30]。

2.3 电驱动可变焦菲涅尔透镜原理

根据菲涅尔透镜的原理，菲涅尔透镜的设计实质上与普通透镜类似，一般的平凸镜焦距与表面曲率半径的公式为：

$$\frac{1}{f} = \frac{(n-1)}{R} \quad (2)$$

式 2 中 f 为平凸透镜的焦距， n 为透镜材料的折射率， R 为透镜表面的曲率半径。由该公式可知，当改变透镜表面曲率半径时，可以达到改变透镜焦距的效果。由于菲涅尔透镜的表面可以认为是光滑曲面分割成许多个同心圆环后组合而成，因此若我们改变菲涅尔透镜表面曲率，便可以实现菲涅尔透镜的变焦。

如图 5 所示，将制备成的柔性菲涅尔透镜与光滑柔性电极分别粘贴在经过预拉伸的介电弹性体的上下两面，当接通电压时，会在介电弹性体薄膜处生成一个电场，对介电弹性体薄膜会产生一个在厚度方向上的压应力，使得介电弹性体薄膜在厚度方向上被压缩在径向上拉伸，从而带动柔性菲涅尔透镜在径向上拉伸，从而改变柔性菲涅尔透镜表面的曲率变化，实现柔性菲涅尔透镜的焦距变化。

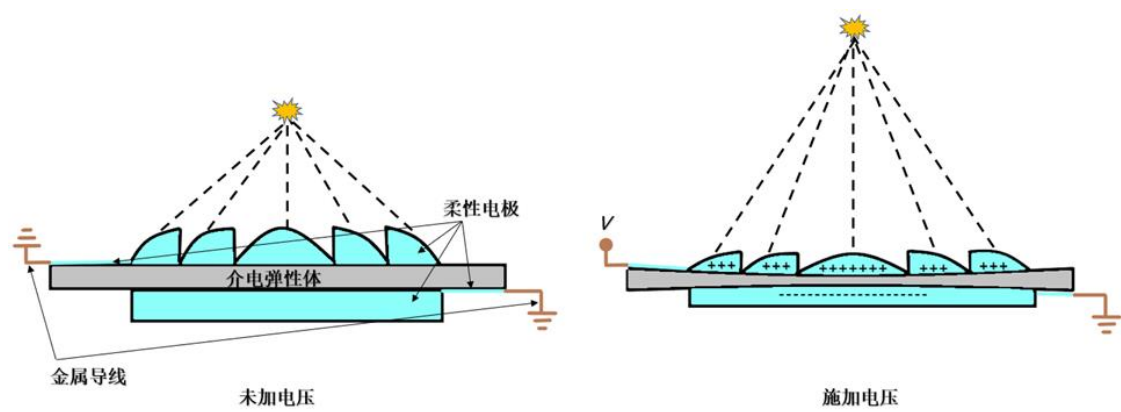


图 5 电驱动可变焦菲涅尔透镜原理图

3. 聚电解质弹性体制备与表征

由于希望使制成的柔性菲涅尔透镜具备足够大的变焦能力,因此需要使材料的弹性模量尽可能降低以及使得制成的柔性菲涅尔透镜尽可能薄,这样便可以使得介电弹性体薄膜更容易驱动柔性菲涅尔透镜使其发生变形。

但除此之外,由于菲涅尔透镜是由许多微结构组成,在微结构的尖端处,若材料的弹性模量过于小,则很难抵抗由于材料表面张力导致的使材料趋于平整的应力。如图 6 中示意图所示,其中 R 为菲涅尔透镜表面原有的结构的表面曲率半径, r 为菲涅尔透镜表面由于材料表面张力作用导致出现变形最终达到平衡后的曲率半径, h 为每个环带的高度, d 为每条环带的宽度。我们定义一个特征尺寸 L_c :

$$L_c = \frac{\sigma}{Y} \quad (3)$$

式中 σ 为材料的表面张力, Y 为材料的弹性模量,该特征尺寸反映了表面张力与材料的弹性模量之比,可以让我们预测出在什么样的尺寸下,材料表面张力引发的变形量不可忽略,而菲涅尔透镜上的每一个环带宽度较小,若由于表面张力导致的变形量过大,则会对菲涅尔透镜的聚焦能力带来较大影响。

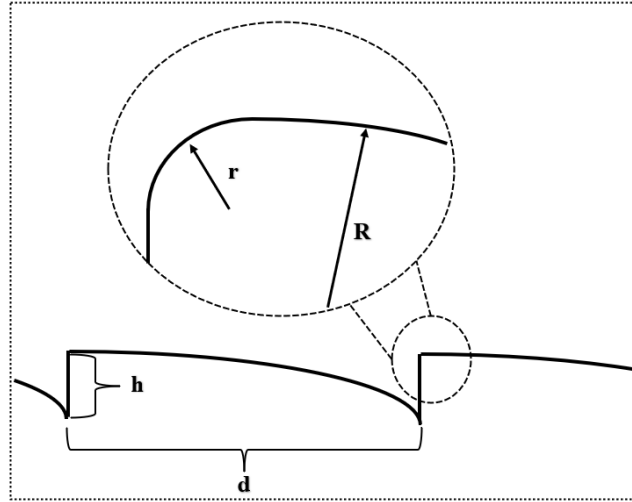


图 6 菲涅尔透镜微结构示意图

在菲涅尔透镜中光线主要在上表面曲率半径为 R 的区域发生折射,因此需要表面张力影响的区域的尺寸远小于曲率半径为 R 的区域的宽度,即 L_c 远小于环带宽度 d ,且 L_c 要大于等于每个环带的高度 $0.5h$,因为表面张力的影响最终会

使柔性菲涅尔透镜在棱处变趋于圆弧形，需要 h 大于等于二倍的 r ，则可以使表面张力对每个环带的高度的影响几乎忽略，由此表面张力使柔性菲涅尔透镜发生的变形对聚焦效果的影响可以忽略不计。

柔性弹性体可以采取将前驱液导入设计好的模具中，之后进行光固化以此获得想要的形状的柔性弹性体，制备柔性菲涅尔透镜时也可以使用这种方法，本实验中使用的菲涅尔透镜模具是使用 PDMS 184 在购买到的亚克力材质的菲涅尔透镜上倒模获得，在显微镜下观察，亚克力菲涅尔透镜每条环带的宽度 d 为 $300\mu m$ ，其透镜材料折射率 n 为 1.49，焦距 f 为 50mm，根据式 2 可以计算出透镜表面的曲率半径 R 为 24.5mm，根据勾股定理可以算出环带的高度约为 $2\mu m$ 。

使用 PDMS 184 为模具是为了最终制备出来的柔性菲涅尔透镜便于脱模，除 PDMS 184 为模具外，还尝试过使用 PVA（聚乙烯醇）做模具，但 PVA（聚乙烯醇）为亲水性材料，制备柔性菲涅尔透镜需要柔性材料与模具有一个清晰的界面，二者不能互相渗透，因此若要使用 PVA（聚乙烯醇）做模具需要一种疏水性材料作为柔性菲涅尔透镜材料，而尝试过两种疏水性材料的弹性模量过大，最终做成柔性菲涅尔透镜较难驱动。并且使用 PVA（聚乙烯醇）需要先在高温下溶解 PVA（聚乙烯醇），在烘箱内蒸干会由于蒸发过于剧烈，无法获得平整表面，因此需要待其缓慢在室温下蒸发才能获得一个表面理想的模具，获得一个模具周期过长，因此放弃这种方法。PDMS 184 为硅基材料，疏水性较强，不会与亲水性材料互相渗透，而且亲水性材料与 PDMS 184 接触角大，因此材料光固化后更容易脱模。另外获得一个 PDMS 184 模具只需要将 AB 液按比例混合，之后抽负压除气泡，最后放烘箱待其固化完成，流程简易，所以综合考虑使用 PDMS 184 作为模具。

为了使电驱动装置可以驱动柔性菲涅尔透镜获得更大变形，因此需要柔性材料弹性模量尽可能小，但同时考虑到表面张力影响考虑 L_c 需要尽可能小，因此又要求了弹性模量不能过于小，最终选取前驱液配方需要综合前驱液表面张力、材料弹性模量与使用模具的尺寸这些因素共同考虑。

测前驱液表面张力使用毛细管悬滴法，使用一个毛细管缓慢滴出液滴，并测量液滴重力，每滴液滴的重量即为在毛细管口表面张力对液滴的张力，并且引入了 Harkins 校正因子：

$$\delta = \frac{r}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r\delta} \quad (5)$$

δ 为 Harkins 校正因子, 式中 r 为毛细管管口半径, V 为每滴液滴体积, 用该方法测得的去离子水的表面张力约为 0.072N/m , 误差在可接受范围内, 故用此方法测量前驱液表面张力。

前驱液是由 BS 与 MEA(丙烯酸-2-甲氧乙基酯)单体共聚, 加入交联剂 HDDA (1,6-己二醇二丙烯酸酯)与光引发剂 1173 (2-羟基-2-甲基苯基丙酮)组成, 其中 BS 单体是由[BMIM]Cl (氯化(1-丁基-3-甲基咪唑))与 K[SPA] (3-磺丙基丙烯酸盐 钾盐)反应得到, 其反应式如图 7 所示。

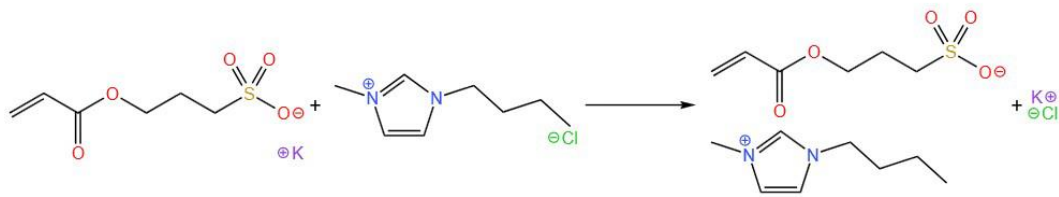


图 7 BS 制备反应式

将前驱液用紫外光光照, 待前驱液固化完成, BS 和 MEA 会共聚并且交联形成如图 8 所示的具有网络结构的长链

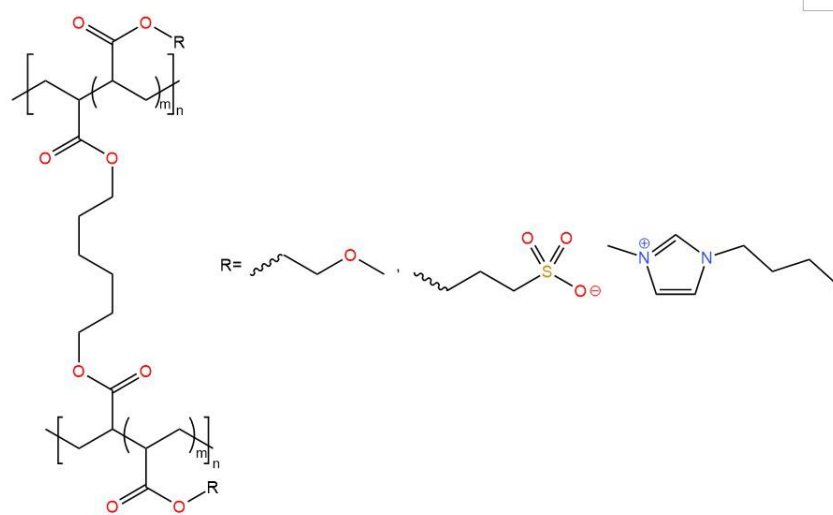


图 8 材料的分子式

测前驱液表面张力可以发现, 由于交联剂 HDDA 与光引发剂 1173 含量很低, 不同比例对前驱液表面张力影响不大, 影响前驱液表面张力的因素主要为 BS 与 MEA 的比例, 室温下(25 摄氏度)测得 BS 的表面张力为 0.052N/m , BS 与 MEA 摩尔量之比为 2: 1 时前驱液表面张力为 0.042N/m , BS 与 MEA 摩尔量之

比为 1: 1 时前驱液表面张力为 0.04N/m, BS 与 MEA 摩尔量之比为 1: 2 时前驱液表面张力为 0.039N/m, 纯 MEA 的表面张力为 0.037N/m。当 BS 在前驱液中占比越高, 会导致前驱液表面张力越大, 为了可以使用尽可能低的弹性模量来获得更大的变形, 获得尽可能小的特征尺寸 L_c 以获得较好的聚焦效果, 在同样交联剂密度和引发剂密度条件下, MEA 的占比越高材料的弹性模量越高。BS 固化后为粘弹性材料, 会使得制成的介电弹性体驱动装置响应速度变慢, 而提高 MEA 的含量可以使材料弹性增强, 使最终制成的介电弹性体驱动装置响应速度更快。但由于 MEA 的含水量高于 BS, 含水量越高会导致最终材料导电率下降, 导电率下降会使最终介电弹性体驱动装置能耗提升。而且可以发现当 BS 与 MEA 的比例在 1: 1 时, 前驱液的表面张力并没有显著下降, 再降低 BS 的含量, 对表面张力的影响并不明显。再结合不同前驱液配比下所获得的材料的拉伸测试下获得的应力应变曲线综合考虑, 最终采用 BS: MEA: HDDA:1173=1: 2: 0.0002: 0.001 作为前驱液的比例来制备材料。在该配方下材料的表面张力为 0.039N/m, 杨氏模量约为 58kPa, 其拉伸应力应变曲线见图 9, 可以算得特征尺寸 L_c 约等于 $0.672\mu m$, 已知所用菲涅尔透镜模具每个环带宽度为 $300\mu m$, 最小的高度 h 为 $2\mu m$, 特征尺寸远小于每个环带的宽度, 因此表面张力不会对制成的柔性菲涅尔透镜表面形貌造成不可忽略的形变, 可以忽略其影响。

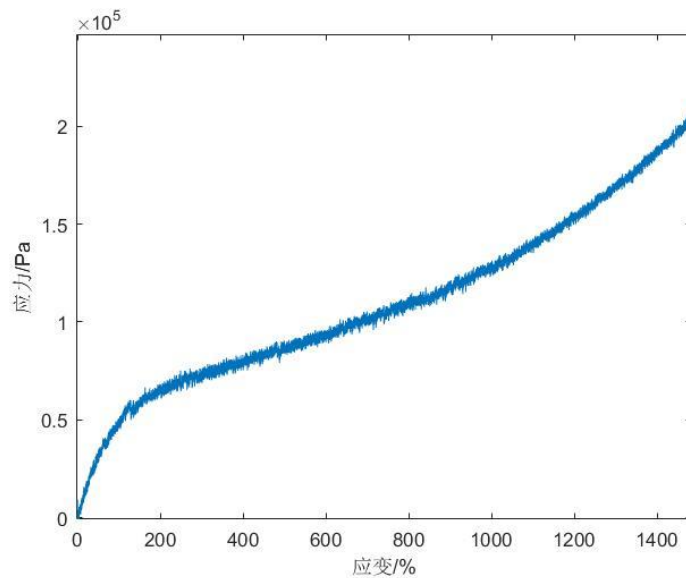


图 9 制备得的材料的拉伸应力应变曲线

此外, 还测量了所用材料的光透过率, 测量时使用的测试薄膜厚度为 $500\mu m$,

测量结果见图 10，在波长大于 600 nm 时材料的光透过率达到了 92%，在靠近 350nm 时，由于材料泛黄，对该波段光透过率有所下降，但实际使用时，作为柔性电极的材料厚度更薄，透光效果会更好。该材料具有较好的光透过率，适合用于作为光学材料使用。

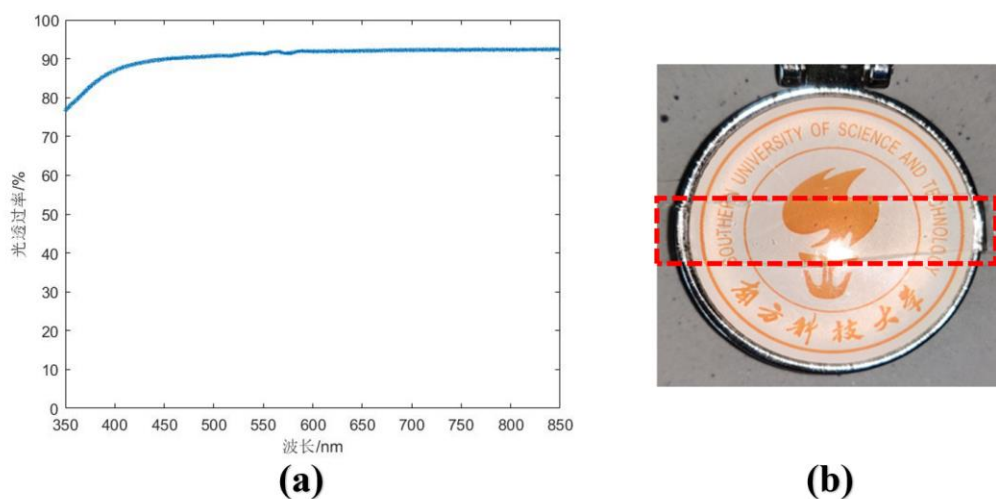


图 10 图 (a) 为 350~850 nm 波长范围内材料透光率图，图中 (b) 图为材料透光展示图，红色虚线框内为粘有该材料部分

4. 柔性可变焦菲涅尔透镜的制备

4.1 透镜材料的制备

如图 11 所示，使用倒模的办法进行柔性菲涅尔透镜的制备，第一步首先用一个容器将亚克力菲涅尔透镜成品粘在容器底部，之后混合好 PDMS 184 的 A 液与 B 液，将混合好的 PDMS 184 溶液倒入容器中，之后将其置于真空环境内，由此可以使得 PDMS 184 溶液中的气泡可以在固化前消去；待溶液中大气泡完全消去，将容器置于 65℃烘箱中，静置 10 小时以上即可完成固化，将 PDMS 模具脱下来即可。之后需要将 PDMS 模具置于无氧环境中，本实验是将其放于充满氮气的环境中。需要等待足够久至 PDMS 模具中含有的氧完全扩散至环境中，保证模具中不含氧，具体时间由 PDMS 模具尺寸决定，否则将会由于氧气阻聚，导致在与模具接触处柔性菲涅尔透镜表面生成褶皱，本文使用的模具为圆柱状模具，厚度约为 3 cm，半径约为 2 cm，在氮气环境中放置 72 h。再之后将混合好的前驱液倒入模具中，并做超声消泡处理，之后将表面涂有硅油的离型膜覆盖在玻璃平板表面，将其覆盖在模具表面，将多余液体挤出，之后将其放于紫外光下进行光照 12 h，待光固化完成，将柔性菲涅尔透镜从模具上取下即可。

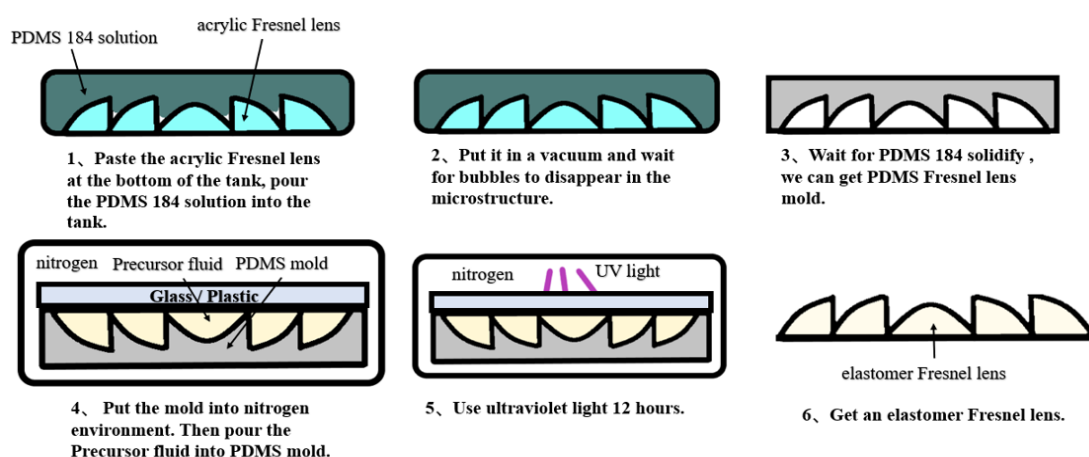


图 9 柔性菲涅尔透镜制备流程

图 12 为亚克力菲涅尔透镜、PDMS 184 菲涅尔透镜模具和制成的柔性菲涅尔透镜在常规尺度下和显微镜下拍的照片，所用的显微镜型号为 VHX-7000，可以观察到制备的柔性菲涅尔透镜具备较好的表面质量。

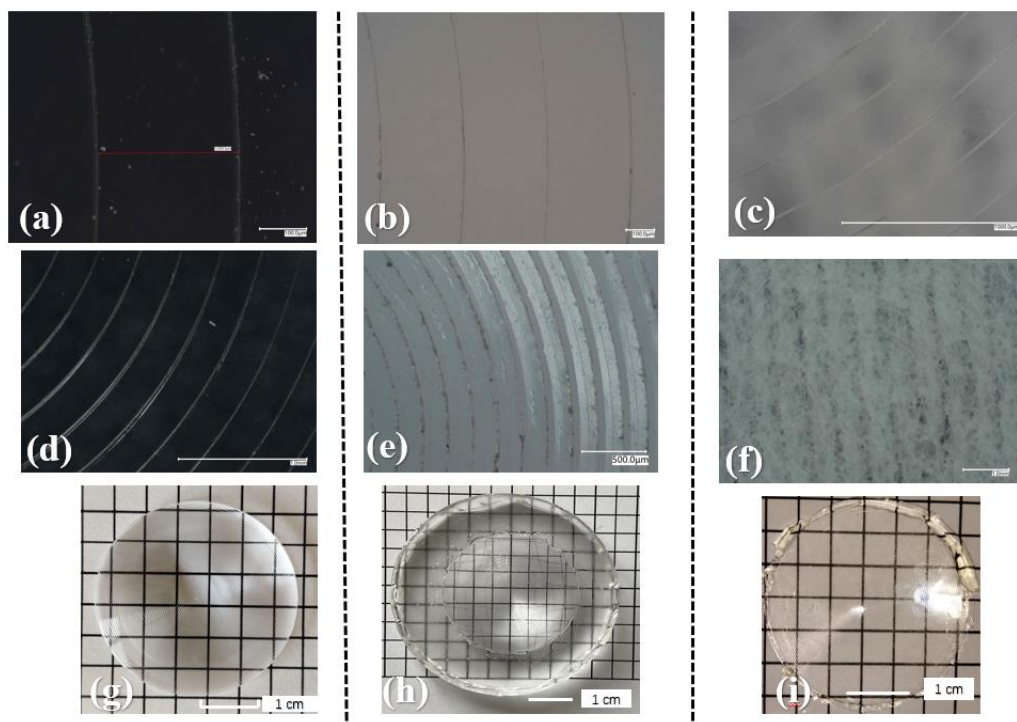


图 12 (a)、(d)、(g) 为亚克力菲涅尔透镜在不同比例尺下的照片；(b)、(e)、(h) 为 PDMS 184 菲涅尔透镜模具在不同比例尺下的照片；(c)、(f)、(i) 为柔性菲涅尔透镜在不同比例尺下的照片

4.2 透镜装置的制备

介电弹性体驱动装置上的介电弹性体薄膜使用经过预拉伸的 3M 公司的 VHB 4910 材料，为了获得更大的可驱动变形量，使用双层的 VHB 4910 粘在一起，之后采用双轴拉伸至原先的 3.5 倍，在远离应力施加处，可以认为在中心处 VHB 是均匀径向拉伸，如图 13 所示，之后用亚克力板裁成的圆环粘在经过预拉伸的 VHB 中间处，以固定预拉伸后的 VHB 薄膜，之后将柔性菲涅尔透镜与柔性电极以及柔性导线粘在 VHB 表面，最终将金属导线粘在亚克力圆环上与柔性导线相连接，即完成组装。

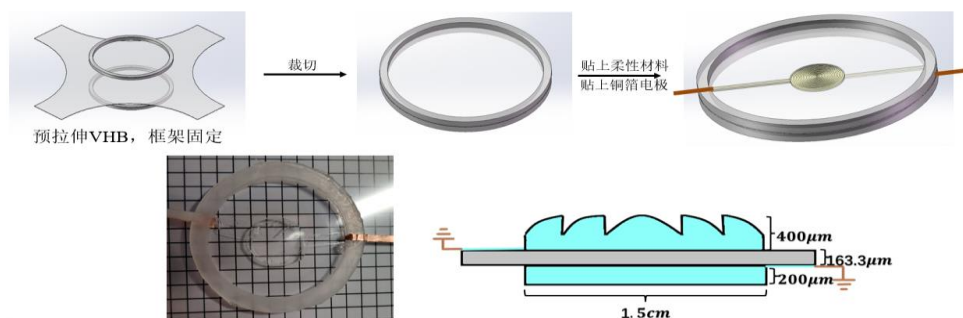


图 13 介电弹性体驱动可变焦菲涅尔透镜装置制备图及实物图与尺寸图

图 14 中展示了不同电压下介电弹性体驱动可变焦菲涅尔透镜的变形情况，图纸每个网格的大小均为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，通过使用采取统计像素点的方式分析图像，可以计算出在加载电压为 9kV 时，柔性菲涅尔透镜电极面积应变量为 28.4% 。在 9kV 时未发生由于电压过大击穿 VHB 薄膜的情况，实际还可以产生更大的面积应变，根据实验经验一般当电压在 10kV 左右时会由于尖端放电，导致击穿 VHB 薄膜，毁坏器件导致器件失效。

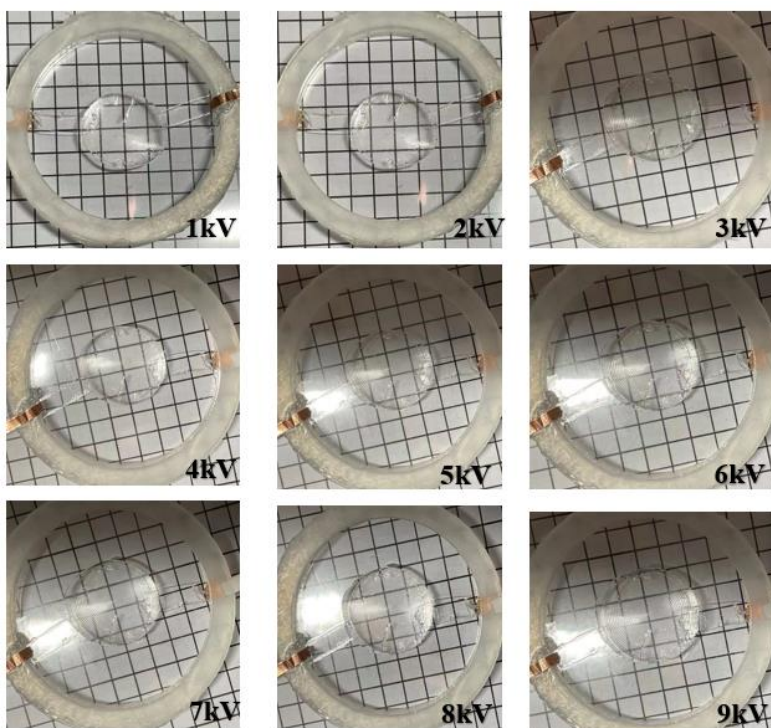


图 14 不同电压下介电弹性体驱动可变焦菲涅尔透镜的变形情况

5. 透镜性能表征

对制成的介电弹性体驱动装置施加电压，实验表明加载电压为 9kV 时，柔性菲涅尔透镜电极面积应变量为 28.4%。为了测量柔性菲涅尔透镜在不同电压下焦距变化，搭建了如图 15 所示的设备，该设备可以为实验提供所需平行光源。该设备通过一个激光光源发出波长为 532nm 的平行光束，通过两个双凸透镜的组合实现光束扩展的效果，两个双凸透镜的间距应为两者焦距之和，在不装备可变焦菲涅尔透镜的情况下，观察成像平面上的光斑可以测得设计搭建的光束扩展器最终可以获得直径约为 1.2cm 的圆形平行光束，实验中所使用的可变焦菲涅尔透镜在不加载电压的条件下直径为 1.5cm，可以完全接收经过光束扩展器后获得的平行光束。当经过光束扩展装置后的平行光束经过可变焦菲涅尔透镜发生折射后可以在后方光屏上观察形成的光斑大小从而判断焦距长度。

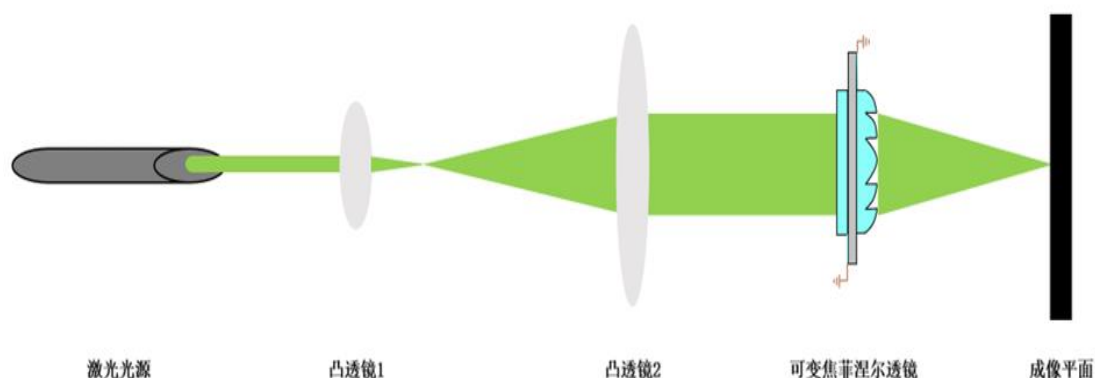


图 15 可变焦菲涅尔透镜焦距测试装置

图 16 为不同情况下在成像平面上观察到的成像情况。可以看到，相比于没

有加上制备的柔性菲涅尔透镜时，放置了柔性菲涅尔透镜的光斑更小且更亮，说明本实验中采用的柔性菲涅尔透镜具有较好的聚焦效果，也说明了其具有良好的表面质量。而当加载了 9kV 的电压时，相比于(b)图没有移动任何器件的位置，成像平面上的光斑变大了且亮度有所降低，说明该柔性菲涅尔透镜的焦距的确发生了变化，使得在同样的距离下，出现了不同的聚焦效果。

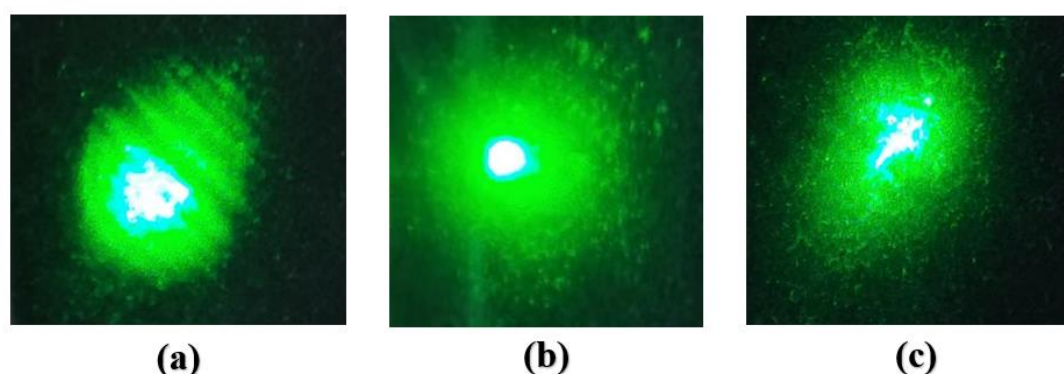


图 16 为当光屏位于柔性可变焦菲涅尔透镜焦点位置时不同情况下在光屏上观察到的光斑图；a 图为不装可变焦柔性菲涅尔透镜时的在光屏上观察到的光斑；b 图为安装可变焦柔性菲涅尔透镜后的在光屏上观察到的光斑；c 图为给可变焦菲涅尔透镜加载了 8kV 的电压在光屏上观察到的光斑

图 17 为不同电压下测得的焦距变化，受设备限制，实验中测量焦距的方法为肉眼观察法，具体测量方法为移动并观察光屏，认为当光屏上呈现最小最亮光斑时，柔性菲涅尔透镜与光屏间的距离即为焦距。测量不同电压下的焦距变化每组电压的间隔为 1 kV，且由于 VHB 具有粘弹性，每次在改变了电压后都需要等待几秒钟待稳定后再测量焦距。由于测量焦距是用肉眼观察光屏寻找最小光斑出现的距离，具有较大的主观性，因此实验中的数据为测量多次后求平均值，图 17 中的误差棒上下限分别表示了出现在该电压下可信焦距最大值和可信焦距最小值。使用这种方法测得的焦距误差较大，设备允许的条件下使用 CCD 测量焦距变化得到的结果误差可以大大减小。使用实验中测得的不同电压下焦距的平均值可以计算出通过本文的制备流程制备得到的可变焦菲涅尔透镜焦距变化量可以大于 28%。

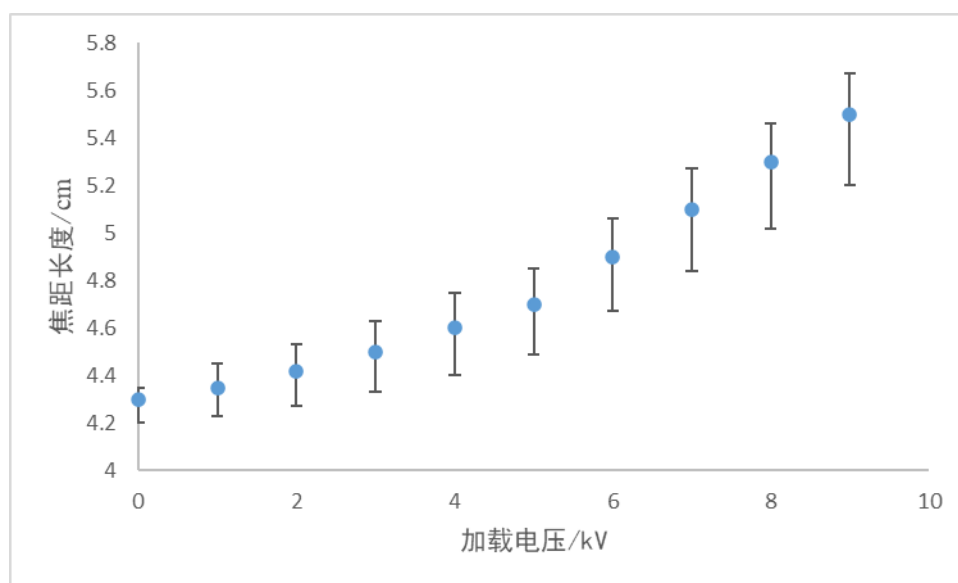


图 17 不同电压下可变焦菲涅尔透镜焦距

6. 结论与展望

本文通过合成制备了一种具有低模量、高度可拉伸、高透明且导电的聚电解质弹性体，使用这种材料制备得到了柔性菲涅尔透镜，设计出了一套便捷、成本低且成熟的介电弹性体驱动的柔性可变焦菲涅尔透镜制备流程，该制备流程不仅可以制备圆形光斑的可变焦菲涅尔透镜，同时也可以制备直线型光斑的可变焦菲涅尔透镜。此外，本文使用的脱模法不仅可以用来制备柔性菲涅尔透镜，也可以制备一些具有其他结构的柔性形状。本文也对具体微结构的尺寸和对材料的要求进行了讨论，所提出的倒模法制备出的成品表面具有较好的表面质量。

通过本文设计的流程制备得的可变焦菲涅尔透镜可以实现 28% 以上的焦距变化。该结果已经远大于目前全固态圆形光斑可变焦菲涅尔透镜焦距变化能力。不过该结果还存在较大优化区间，诸如实际使用的前驱液交联密度还可以进一步降低，当前驱液交联密度降低时，经过光固化后得到的聚电解质弹性体的模量还会进一步降低；亦或可以优化介电弹性体驱动装置中经过预拉伸的 VHB 薄膜面积与柔性电极面积之比。柔性菲涅尔透镜由冠部的微结构部分与底部的连续介质段组成，底部连续介质段对光路折射不发挥作用，理论上底部连续介质段可以尽可能的薄。而本实验中使用的柔性菲涅尔透镜总厚度约为 $400\text{ }\mu\text{m}$ ，冠部的微结构部分最高高度不过十几微米，可以通过减少柔性菲涅尔透镜连续段厚度以减少柔性菲涅尔透镜部分刚度在同样电压驱动下来获得更大面积应变，以增大其变焦能力。

本文设计的这种柔性可变焦菲涅尔透镜在激光雕刻、太阳能富集及微波成像等领域具有重大应用前景，诸如本文再第一章提到的菲涅尔太阳能收集装置若通过本设计改变菲涅尔透镜焦距，通过合理的光路设计，便可以大大提高菲涅尔太阳能收集装置在日间的功率，根据 Adam R. Jensen^[10]等人的研究，图 1 (c) 图中所展示的位于丹麦的菲涅尔太阳能收集装置一年平均每平米产能 375 KWh，在日间绝大多数时间，其功率只有阳光垂直菲涅尔透镜平面入射时的功率的不到一半，而介电弹性体驱动的柔性可变焦菲涅尔透镜优势就在于能耗小、成本低且工作稳定，经过估算使用本文设计的可变焦菲涅尔透镜工作一年约耗能 0.08

KWh, 若是通过合理设计可以极大程度提高菲涅尔太阳能富集装置经济效益, 具体细节还需更细致的研究进一步探究。

参考文献

- [1] Xie W T, Dai Y J, Wang R Z, et al. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(6): 2588-2606.
- [2] Leutz R, Suzuki A, Akisawa A, et al. Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators[J]. Solar energy, 1999, 65(6): 379-387.
- [3] Ma X, Liang S, Jin R, et al. Characteristics of a zoomable Fresnel lens (ZFL) used for solar concentration[J]. Energy, 2020, 194: 116698.
- [4] He J W, Zhao C M, Yang S H, et al. Design of a Solar Pumped Solid-Stated laser[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology., 2007, 27(12).
- [5] Hain M, von Spiegel W, Schmiedchen M, et al. 3D integral imaging using diffractive Fresnel lens arrays[J]. Optics express, 2005, 13(1): 315-326.
- [6] 汪洋, 王元庆. Auto-stereoscopic display for multi-users[J]. 液晶与显示, 2009, 24(3): 434-437.
- [7] 闵森林, 王元庆. New stereoscopic display system based on Fresnel lens[J]. 液晶与显示, 2007, 22(3): 306-309. [8] W.T. Xie, Y.J. Dai, R.Z. Wang, K. Sumathy, Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses : a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (6) (2011) 2588–2606.
- [9] Gupta M, Bhatnagar A, Dubey A K, et al. Dual Fresnel lens and segmented mirrors based efficient solar concentration system without tracking sun for solar thermal energy generation[J]. Energy for Sustainable Development, 2022, 66: 201-208.
- [10] Jensen A R, Sifnaios I, Caringal G P, et al. Thermal performance assessment of the world's first solar thermal Fresnel lens collector field[J]. Solar Energy, 2022, 237: 447-455. [11] Nair M, Ganesan A, Ramamurthy K. Conceptual design and assessment of a profiled Fresnel lens daylight collector. Lighting Research & Technology. 2015;47(5):533-547.
- [12] 张兰, 严惠民, 施柏煊, 等. 菲涅耳透镜对平行光的成像特性分析[J]. 光学仪器, 2000, 22(1): 15-20.
- [13] Grzybowski B, Qin D, Haag R, et al. Elastomeric optical elements with deformable surface topographies: applications to force measurements, tunable light transmission and light focusing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 86(1-2): 81-85. [14] L. Chen, M.

- Ghilardi, J. J. Busfield, F. Carpi, *Front. Robot AI* 2021, 8, 678046.
- [15] Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1979, 18(9): 1679.
- [16] Jamali A, Bryant D, Zhang Y, et al. Design of a large aperture tunable refractive Fresnel liquid crystal lens[J]. *Applied optics*, 2018, 57(7): B10-B19.
- [17] Berge B, Peseux J. Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting[J]. *The European Physical Journal E*, 2000, 3: 159-163.
- [18] Zhang D Y, Lien V, Berdichevsky Y, et al. Fluidic adaptive lens with high focal length tunability[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(19): 3171-3172.
- [19] Takai Y, Koshiishi R, Kirita S, et al. Electrowetting fresnel lenticular[C]//2012 IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). IEEE, 2012: 632-635.
- [20] 王鑫,赵悠然,徐近博等.基于电润湿效应驱动的液体菲涅尔透镜[J].*液晶与显示*,2022,37(08):942-947.. Paris, France: IEEE, 2012: 632-635.
- [21] Ma X, Liang S, Jin R, et al. Characteristics of a zoomable Fresnel lens (ZFL) used for solar concentration[J]. *Energy*, 2020, 194: 116698.
- [22] Pelrine R E, Kornbluh R D, Joseph J P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 64(1): 77-85.
- [23] Chen B, Sun W, Lu J, et al. All-solid ionic eye[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2021, 88(3).
- [24] Liu S, Qiu Y, Yu W. Self-Contained Focus-Tunable Lenses Based on Transparent and Conductive Gels[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, 305(11): 2000393.
- [25] Peng Z, Shi Y, Chen N, et al. Stable and High-Strain Dielectric Elastomer Actuators Based on a Carbon Nanotube-Polymer Bilayer Electrode[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(9): 2008321.
- [26] Zhong H, Xue Q, Li J, et al. Stretchable Transparent Polyelectrolyte Elastomers for All-Solid Tunable Lenses of Excellent Stability Based on Electro–Mechano–Optical Coupling[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(3): 2200947.

- [27] Park S, Park B, Nam S, et al. Electrically tunable binary phase Fresnel lens based on a dielectric elastomer actuator[J]. *Optics express*, 2017, 25(20): 23801-23808.
- [28] Pelrine R E, Kornbluh R D, Joseph J P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 64(1): 77-85.
- [29] Verma S, Verma A, Kumar V, et al. Concentrated photovoltaic thermal systems using Fresnel lenses—A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 4256-4260.
- [30] Jensen A R, Sifnaios I, Caringal G P, et al. Thermal performance assessment of the world's first solar thermal Fresnel lens collector field[J]. *Solar Energy*, 2022, 237: 447-455.

致谢

首先要感谢杨灿辉老师对我的指导，本文研究的主要内容 DEA 驱动可变焦菲涅尔透镜这个内容就是杨老师想出来问我愿不愿意做，我才知道了这个课题并开始着手。从研究方向到实验所需器材及材料包括许多操作时的细节怎么做都是杨老师给我提供的帮助，在完成本课题的过程中遇到过很多问题，像是之前用 PVA 作为模具时，对材料的摸索杨老师给了我许多建议，在使用 AT 为柔性菲涅尔透镜材料时，因为 AT 模量过大杨老师就给了我预拉伸的建议；之前制备柔性菲涅尔透镜时，都是将前驱液放在模具中然后就在敞口的条件下进行光固化，最终导致获得的柔性菲涅尔透镜由于前驱液表面张力，在应该平的那一边有个弯月面的形状，也是杨老师给了我做模具的方法，最终才能完成预期目标；此外在涉及微结构表面浸润、微结构尺寸和材料表面张力及模量的关系这一部分，也是杨老师考虑到给我讲了具体分析才让我意识到还需考虑这些因素；之前其实一直都是在将模具暴露在空气环境下固化柔性菲涅尔透镜，导致透镜表面有非常多褶皱，根本无法实现聚焦的目标，当时的我根本想不到原因，还以为是在脱模时的残余应力导致的，也是杨老师给了我正确的方向；还有在将制备得的柔性菲涅尔透镜从离型膜上撕下时，我总是撕不好，我觉得根本无法在不破坏表面微结构的前提下撕下来，也是杨老师给了我具体操作方法，告诉我他以前学生时一百微米的薄膜都撕下来了，我才相信能真的撕下来，并且有耐心用杨老师说的方法成功撕了下来；还有文章撰写的行文逻辑、文章架构、作图规范等问题杨老师都无微不至的给了我指导。

真的非常感谢杨老师对我的指导，在我有任何问题时杨老师都会帮我想出解决思路，而且杨老师也会非常耐心地允许我自己试探摸索，本课题大约跨度有将近一年的时间，期间走了很多弯路，都是杨老师对我不断激励表扬，才能让我有坚持做下的动力，真的真的真的真的真的真的非常感谢杨老师。

还要感谢张平师姐，从我大二进入实验室开始，就是师姐在带我，当时我什么都不懂，对软材料一无所知，师姐从软材料的结构开始一点点给我从最基础的概念讲起，软材料如何光固化、打 plasma 的仪器、拉伸机的使用、流变仪的使

用等……很多实验室内的操作规范、设备使用都是张平师姐给我教的，包括在课题中像浸润性的一些问题，包括我能使用什么作为模具，还有脱模时的一些细节张平师姐都给了我建议，很感谢师姐对我的帮助与鼓励。

还要感谢钟浩师兄，这个课题从一开始用 PVA 倒模法就是钟浩师兄教给我的，师兄手把手带我走了一遍做 DEA 的流程，包括激光切割机怎么使用也是钟浩师兄给我教的，还有 BS 的合成也是师兄教我合成的，在做课题时我也用了许多师兄买的材料也设备，给我提供了很大的帮助。

要感谢何耘丰师兄，何耘丰师兄也对我帮助很大，我真正意义上的开始在实验室做课题就是师兄带我开始做的，当时做制备水凝胶微球，从那时开始我才真正的进实验室开始做实验。后来在做本课题时，师兄告诉我 PVA 是亲水性材料，得使用一个疏水性材料才能保证微结构界面完整，给了我许多材料上的设计，像用过的 AT 和 TA 都是师兄帮我想出来的方法，后来开始用 PDMS 184 也是师兄给我教了怎么用，怎么用那个旋转搅拌机，此外还有像磁子搅拌机、旋蒸仪、手套箱还有显微镜的使用都是师兄给我教的，对本文研究内容帮助很大。

要感谢薛琪琦师姐，后来在使用 AT 和 BS 这个阶段，师姐对我材料前驱液的配方提出了许多建议，给了我大致的探索范围和方向，像用 MEA 和 BS 共聚就是师姐给的建议，也是师姐告诉了我这些材料的性能趋势，师姐还对我在拉伸试样的实验环节给了我指导，帮我优化了我的试样形状，也纠正了拉伸测试时的错误，还有教会我用稀释后的光引发剂和交联剂，在此之前我都不知道这种方法的，每次光引发剂和交联剂加的剂量误差都很大，师姐对本课题帮助很多。

要感谢黄渊师兄，师兄也在我用 MEA 和 BS 共聚引发剂和交联剂的配比问题上给了我建议，像我不知道共聚后万分之二的比例时对于 BS 摩尔量来说还是对于 MEA 加上 BS 的摩尔量来说，就是问师兄的。

要感谢袁熠明师兄在实验中帮我改正了我的拉伸测试方案的设置。

还要感谢我的舍友李葆琛，是他给我看了许多液体透镜还有一些光学设计方面的内容，很多光学方面的知识都是找他问的，包括在焦距测量、光路设计等方面

面的一些规范，都是他给的我意见。

要感谢我的舍友叶瀚文，本文中图 7 和图 8 就是他帮我画的。

很感谢为本文的完成提供过帮助的各位老师师兄师姐和舍友们。。