应用光学

〔苏联〕Б. В. 費菲洛夫著

北京工业学院仪器系应用光学教研組译

中国工业出版社

应 用 光 学

〔苏联〕Б. В. 費 菲 洛 夫 著
北京工业学院仪器系应用光学教研組译

中 国 工 业 出 版 社

本书詳細地叙述了几何光学的理論，其中包括光学成象缺点的探討，以及与此有关的三級象差理論的詳尽分析。同时，叙述了大多应用于测量工作的光学仪器的基本类型，并分析了其光学結构的特点。

本书可作为高等学校光学机械仪器专业学生的光学参考书，同时，也可以作为光学仪器工厂有关工作人員和有关测量工作人員的光学理論参考书。

本书由丁汉章、于美文、甘子光、王鉷、馮义濂、盛尔鎭同志翻譯；馬士修同志审校。

проф. Б. В. Фефилов

ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА

ГЕОДЕЗИЗДАТ МОСКВА 1947

* * *

应 用 光 学

北京工业学院仪器系应用光学教研組譯

（根据测繪出版社紙型重印）

*

国家测繪总局测繪书刊編輯部編輯（北京三里河国家测繪总局）

中国工业出版社出版（北京佟麟閣路丙10号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第110号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本787×1092 1/16·印张30 3/4·字数691,000

1959年9月北京第一版

1962年10月北京新一版·1965年1月北京第三次印刷

印数1,150—2,199 ·定价（科五）3.50元

*

統一书号：K15165·1350（测繪-17）

目　录

第二部分 光学仪器

原　序

在測量学院航空摄影測量和光学机械专业中，应用光学是一門独立講授的課程。此外，莫斯科土地規划工程学院大地測量系的学生也学习这門課程。測量学院中不同的专业对本課程提出了不同的要求。在莫斯科大地、航測和制图工程学院❶光学机械系的教学計划中，应用光学是一門主要的专业課程。上述专业的应用光学全部課程的大綱中包括下列各个部分：（1）几何光学；（2）光学成象的缺点和象差理論；（3）光学仪器；（4）常数的測定和光学部件的試驗；（5）装配和校正的方法及（6）課程設計。

本書主要供光学机械专业的学生使用，在該专业中应用光学課程的时数和內容均最多。書內包括上述大綱里前三个主要部分的內容；而大綱里其余三个部分的內容則未列入本書之內。

关于大綱中的“常数的測定和光学部件的試驗”一部分，1941年苏联測繪出版社曾出版过技术科学碩士 B.A. 阿法納西耶夫所著的“光学实驗室实驗指南”一書。这本参考書系根据莫斯科測繪工程学院光学机械系的教学大綱編写而成，因而它和应用光学課程大綱里的各个部分符合。

光学仪器装配和校正的方法，以及課程設計的教材（光学計算基础）未列入本書內，因为要想适当地发揮大綱內的上述部分，需要編写专門的指南，其內容在本書的篇幅里是难以容納的。此外，这些部分的內容应在計算－設計方面作专門的研究，并且它是同光学仪器制造工艺过程有密切联系的。

論其內容，本書是应用光学专业課程的緒論，它应符合于莫斯科測繪工程学院光学机械系的大綱的其余部分。本書內容包括两部分：第一部分（几何光学）討論光学成象的一般理論和研究共軸球面系統成象的缺点的象差理論。在象差理論中，主要是闡明作为課程設計緒論的理論材料。第二部分（光学仪器）是叙述一般包括在光学課程中，但在研究天文－大地測量仪器和摄影測量仪器的光学部分方面較为专門的材料，因此，縮减了軍用光学仪器的內容。

編写本書时，曾考虑到莫斯科測繪工程学院光学机械专业要单独地学习大地測量学、天文学和摄影測量学等課程，而学生在这些課程中可詳尽地熟悉有关的仪器和器械的光学部分的构造。

考虑到补充理論課程时要編写习題集和单独的練习材料❷，所以本書中很少例举說明某些公式和方法实际应用的例子。成象缺点和賽特三級象差理論一篇发揮得比較全面。这对于保証进行专业設計是必要的。

---

❶以下簡称莫斯科測繪工程学院。

❷其中关于几何光学的一般部分，1938年內务部人民委員会測繪总局編輯出版局曾出版了本書著者的“应用光学习題集”。

在象差理論的講述中，著者在方法观点上作了部分的重复。虽然象差理論公式的推导乍看并不显得特別困难，但是，要掌握象差理論对学生来說却是一个相当繁重的工作。著者多年的教学經驗証明，講授象差理論时应本着循序漸进的原則，必要时可作部分的重复。

賽特三級象差理論的公式的全部推导是按照凱尔別尔(1909年)的理論用三角函数展开成級数的方法，而不是用光程函数法。下面的情况迫使著者只有这样做：在俄文文献中沒有按照凱尔別尔理論的三級象差公式的展开式，而在Г.Г.斯留沙列夫所著的“光学系統計算方法”（1937年版）一書中，上述公式又是按照史瓦尔茨西尔特的理論用光程函数法推导的；除此之外，著者个人的教学經驗也証明，用三角函数展开成級数的方法推导象差公式学生容易理解，而且易于接受。同时在講課时最好不要完整无遺地講述推导过程中所碰到的許多的数学換算。考虑到具体学生和他們对講授材料的接受能力，教师可以縮減推导，在許多情况下，可限于引証一下过去已講过的类似之处。

除生产上采用的計算公式外，本書尙推导和提出不同于生产部門采用的公式和略图。这样做的目的，是在于保持从前光学書籍的传統和便于熟悉专业杂志（例如外国的）。本書未研討公差問題和有关破坏光学系統共軸性的現象。所有这些問題将是上面提到的专門指南講述的对象。

学习应用光学課程应加强学生的課外作业。莫斯科測繪工程学院講授应用光学的經驗証明，为了牢固地巩固光学知識，需要解算大量的練习题。同时，精确的繪图，并在图上註出作为习题条件的全部数据和計算結果是有很大的帮助的。

通过实驗巩固学生的知識同样是极其重要的。光学实驗室的实驗特別有益地影响着学生眼界的扩展和促进他們的創造性的成长。实驗应与講課平行地或者是在講完需做实驗的相应部分后进行。为了激发学生的創造主动性，必須力求布置給学生能够发揮最大限度独立性的实驗，而指导教师的責任只是一般的监督和技术輔导。

著者認为，本書对其他非測量学院的光学机械专业，以及从事光学仪器工作的广大人員是一本有益的指南。

著者有責任向大力帮助著者准备付印手稿的莫斯科測繪工程学院前高級实驗員Н.В.尤魯什金娜和光学机械工程师М.И.阿平科致以眞誠的謝意。著者謹向审查和校閱本書时，予以极大重視并提供了許多宝貴意見和指示的А.С.契巴塔廖夫教授、博士表示特別的感謝。

同样应該指出Г.Г.斯留沙列夫博士和М.М.魯新諾夫博士所給予的帮助，他們的批評性的意見大大地促进了手稿的完善，为此著者也致以特別的謝意。

感謝莫斯科測繪工程学院前任主任講师С.П.波利亚科夫积极参加編写本書第二十章的工作。最后，謹向科学院通訊院士、国立光学研究所和全苏計算工作的組織者А.И.图托洛夫斯基教授致以特別的謝意。他所著的可貴的“光学仪器理論”一書对本書的出版起了极其重要的作用。

技术科学博士 Б.В.費菲洛夫教授

第一部分　几何光学

第一篇　一般部分

第一章　几何光学的基本定律

§1. 几何光学的对象及其与其他課程的关系

几何光学在研討光学現象时是利用光綫为直綫的概念。用实驗方法确立的几个原理是几何光学的基础。进一步深刻地研究光学現象証明，所有的光学現象幷非都能用几何光学的方法来解释，当解决有关光的传播和光学成象的广泛問題时，几何光学的原理仅是近似的。

几何光学不考虑光的衍射和干涉現象，因此，許多与光学成象有关的問題，不能够完全利用几何光学来解决。以后我們可以看到，这样的問題包括有：光学仪器的鑑別本領或分辨本領，显微鏡的成象理論，光学系統的品質等。为了妥善地研討上述問題，除光綫光学外，尙需利用波动光学的方法。

几何光学本身具有很大的实用意义，因为它的原理与光学仪器內許多被观察到的，有时是复杂的現象正好相符合；几何光学借助于簡单的数学方法不仅能解释这些現象，而且能得出光学仪器設計和計算的方法。

根据几何光学的定律制造的光学仪器具有极其完美的品質，并且在科学和技术各个領域內获得了各种不同的应用。所以，对于光学专家，研究几何光学是非常重要的。它为了解光学仪器的构造和作用奠定了坚固的基础。

§2. 发光点和光綫的概念

几何光学利用发光点的基本概念，将发光点理解为一个沒有大小的光的輻射源。因为发光点是光能的来源，显然它本身的体积密度应为无穷大；这个假設与能量的基本物理概念相矛盾。任何的物点皆具有有限的大小和体积；它所显現的大小随着物点和观察者間的距离不同可能較大或較小。由經驗得知，人眼有着一定的鑑別本領，观察者眼睛所看到的圓状物体，当視角約为1′时，就好象观察到一个点。可見几何光学的发光点实际上幷不存在，它的概念是按照数学的方式而引入的。

关于几何光綫的概念也发生同样的矛盾。在几何光学里将几何光綫理解为横截面沒有大小的几何綫状的光束。显然，在这种情况下，沿着光綫流动的光能的体积密度应为无穷大，实际上这是不可能的。

几何光学的光綫也是一个实际上并不存在的数学形象。它可以用以下的方法去理解光綫。設想在发光体的表面上选出一微面 ΔS_1。从微面发出的光能向各方向传播。如在距微面 ΔS_1 的某处（图1）放置第二个微面 ΔS_2，那末光流将充滿微面 ΔS_1 和 ΔS_2 的周边直紋表面所限的空間。这个空間可称为光管。因为可以設想面 ΔS_1 和 ΔS_2 为二个微面，所以这样的管可以叫做物理光綫。几何光学中把光綫理解为这个光管的軸綫 O_1O_2。如果在图1上放置两个带孔的不透明光闌 A 和 B，并使孔的大小与光管的横截面符合，則在光闌 B 的后面生成阴影，但微面 ΔS_2 上的光斑仍旧不变。逐漸縮小光闌孔 A 和 B 时，ΔS_2 上的光斑开始縮小，此后再繼續縮小光闌孔径时，便开始增大，这样就使光在光束外的几何阴影范围內出現，而破坏了光的直綫性。这种现象叫做光的衍射。

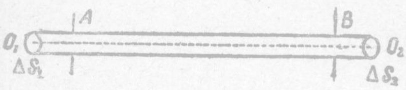

图 1

总之，几何光学的发光点和光綫乃是由試驗中抽象出来的一些数学概念。

从波动光学的观点上看来，球形的波面就相当于点的輻射，輻射源位于此球的中心。能量沿着波面法綫或几何光学的光綫的方向传播。波面可以当作波动位相相同的几何点的位置来确定。波面的法綫相当于几何光学內的光綫。

§3. 同心光束和象散光束。点象

从发光点发出的光綫向四面八方传播，构成所謂不受限制的光束。如果在光源外面的光路上放置一个带孔的不透明光闌，則我們就得到一限制的光束。从一个共同中心——发光点——发出的光束称为发散同心光束。球形波面相当于一同心光束。球面的法綫就是同心光束的光綫。反之，如果光束向光束的中心会聚，則称这个光束为会聚同心光束。每一个光学仪器的任务在于：使一个发散（会聚）同心光束經反射和折射后轉換为另一个会聚（发散）同心光束。在此情况下，光束中心 S 和 S'（图2）分别称为物和象。在保持同心性的情形下，每个光源点（物点）都給出一个象点。这样的象称为点象或斑点象。如果想象倒轉象 S' 的光路方向，則光学系統就将入射光束变为具有光源中心 S（物）的光束。这样相互轉变的两个点和两个光束称为相对于光学系統的共軛点和共軛光束。

如果光束的同心光綫（而不是其延长綫）实际相交于其几何中心，則称該象点为实点。反之，如果光束的光綫实际不經此点，而在此点相交的只是光綫的几何延长綫，則称該象点为虛点或虛象。实象可在光屏上或照象板上得到；虛象不能投射到光屏上，在眼睛感覚着它好象是一个实发光点。

在大多数的情况下，光学系統常改变原来球形波面的形状；光經过光学系統后，波面不再是球形，因此破坏了光束的同心性和斑点性。变形波的法綫并不能交于一点。

图3所示的 $M_1M_2Q_1Q_2$ 为变形波面的一小部分。假定直綫 OF_2F_1 为面中心 O 点的法綫。在波面上可选择二条互相垂直的截綫，其中一条的曲率半径最大，而另一条的最小。曲率半径最大的波面截綫 M_1OM_2 的曲率中心位于 F_1 点；曲率半径最小的波面截綫 Q_1OQ_2 的曲率中心位于 F_2 点。无限接近截綫 M_1OM_2 的截面法綫，例如在中間截綫

一边的截綫$N_1Q_1N_2$和另一边的截綫$P_1Q_2P_2$的法綫在无限接近中心点F_1的曲率中心处相交，它們的交点位于某一小段直綫 $F_1'F_1F_1''$ 上。无限接近截綫Q_1OQ_2的光波截面的法綫，例如$N_1M_1P_1$和$N_2M_2P_2$的法綫在接近曲率中心F_2点处相交，并且位于一小段直綫$F_2'F_2F_2''$上。这样，微波面 $M_1M_2Q_1Q_1$ 上所有点的法綫都通过无限小的直綫$F_2'F_1F_1''$，然后分开，穿过F点的正方形后又重新通过一小段直綫$F_1'F_1F_1''$。

图 2

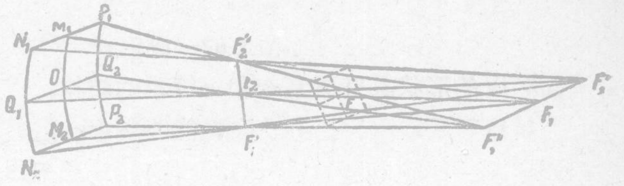

图 3

因为波面的法綫就是光綫，很明显，所討論的光束的光綫无論在何处也不能会聚于一点。光綫是沿着两条分别叫做第一和第二焦綫的两小段直綫相交。这种結构的光束称为象散光束。平面$M_1F_1M_2$与平面$Q_1F_2Q_2$垂直，乃是光束的主截面。直綫OF_2F_1就是光束的軸綫。两小段焦綫之間的距离F_1F_2称为象散差。象散差愈小，則光束愈接近同心光束。随着象散差F_1F_2的消失，光束就变成了同心光束。

§4. 焦散綫和焦散面

变形波面具有比上节所討論的波面和相应的象散光束更为复杂的形状。图 4 所示，

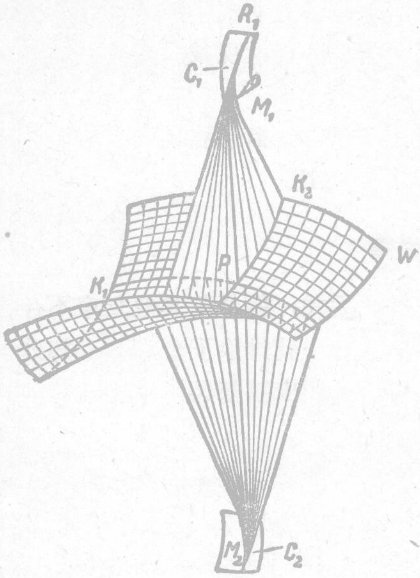

图 4

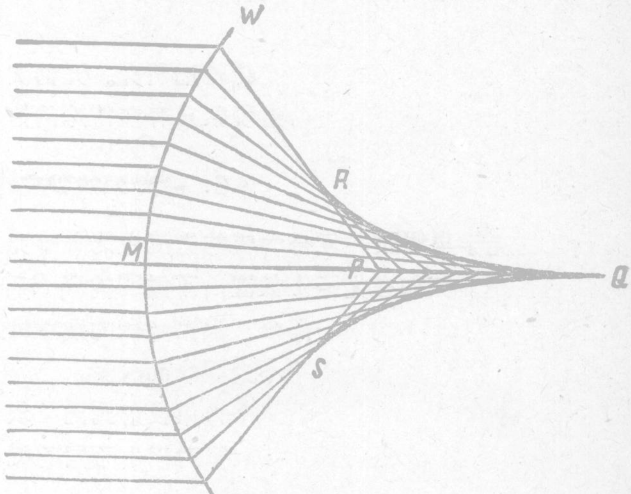

图 5

为波面 W 的一部分。在此表面上，可以找出曲率半径最大和最小的两个主要方向的截綫。曲率中心位在波面的各方。在表面W上繪有两組称为曲率綫的曲綫。在K_1和K_2两

条曲率綫上的所有点上作出波面的法綫，法綫当中就有主截綫的曲率半径；两組法綫形成二直紋面M_1PK_2和M_2PK_1。两小段綫K_1和K_2的曲率中心則形成两条直綫R_1M_1和R_2M_2，这两条直綫叫做焦散綫。如果对波面W上的所有曲率綫完成上述作图，我們就得到两部分曲率中心的几何軌跡，叫做焦散面。

如果波面为繞軸綫MQ的迴轉面WW（图5），这时焦散面RQS也是焦散綫RQS繞軸綫MQ迴轉时所形成的迴轉面；在这种情况下，焦散綫是曲綫WW的漸曲綫，而另外的一部分焦散面則变为对称軸上的一段直綫PQ。焦散面RQS，以及第二部分焦散面根据波面WW的形状具有更复杂和更簡单的結构。

在焦散面最狹窄的地方发生光能的集中；这就是称它做焦散面或焦面的原由。有关焦散面在某一垂直于軸的平面截面內的能量分配問題，用物理光学的方法始能解决，因为需要估計到光的干涉現象：光綫在焦散面截面上的几何分配可能与光能在光束截面上的实际分配全不相符。

§5. 光的直綫传播定律

几何光学里認为，光在透明而均匀的（各向同性的）媒質中是沿着直綫传播的。日常的經驗使我們确信这一定律的正确性。从某些宇宙現象的观察，例如日蝕或月蝕，确定了光传播的直綫性。利用最精密的大地測量方法，例如根据精密測角仪器測量三角网中一三角形三內角的結果能使人更深信这一定律的正确性。当观測很仔細时，測得的三角形三內角的总和与实际的总和（$180° + \varepsilon'$）間的差值总是在与測角仪器的精度相关的可能的观測誤差范围以內。当光束通过窄孔或在光路上放置不透明的小障碍物时，光传播的直綫性便遭到破坏。在这种情况下，便产生了以上指出的衍射現象，此时光进入几何阴影的区域以內。

衍射現象在物理光学內要詳細地研究。几何光学完全不考虑衍射現象，因为在一般使用光学仪器的条件下，衍射現象只有在特殊的情况才能显出。

§6. 諸光束的独立性定律

几何光学里假設，复合而成的光流中的各个光束彼此无关，就好象其他光束不存在似的传播着。例如在光路上放置一不透明的屏R后（图6），就排除了光束組成部分中的某一部分。根据光綫的独立性定律，我們应該認为，未通过屏的光綫的作用不会因此而改变。

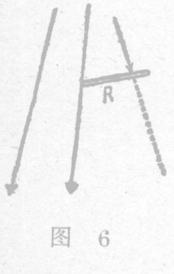

图 6

如果两个光束投射到同一块平面上，則此二光束的作用叠加。光綫的独立性定律对于由不同的輻射中心发出的光束始終是正确的。

当两个光束从同一个輻射中心发出，以不同的途径到达某一点，并在該处发生光的减弱或完全消灭的現象（产生黑暗），按照光的独立性定律，此时两个光束的共同作用代替了期待的光的加强。这种現象叫做光的干涉。評价象的品質时，必須考虑到这种現象。

在以前討論焦散面时曾指出，由于波面发生变形，点象能具有复杂的形状，显現为

圆形或更复杂的散射图形。散射图形上的光能分布能由光綫交点在图形上的集中情况判断。但是可能出現这种情况：当某些光綫投射到平面上的同一点时，由于彼此干涉而削弱，并产生暗影。因此，在光学仪器理論解决照度沿散射圆分布的問題时，不能局限于几何光学的原理，而应該注意到干涉現象。

§7. 反射定律

若光綫在它传播的路途上遇到两媒質的拋光分界面，则它将按照反射定律改变自己的方向。在图7内PP为两媒質間的拋光分界面，NA——此界面上入射点A处的法綫，SA——入射光綫，AS'——反射后光綫的方向。等于角i的入射光綫与法綫的夹角SAN称为入射角；等于角i'的反射光綫与法綫的夹角$S'AN$称为反射角。由是得反射定律如下：入射光綫，分界面的法綫和反射光綫在同一平面上；入射角和反射角的絕对值相等，但由于两光綫位于法綫的两侧，故符号相反。

$$i=-i' \tag{1}$$

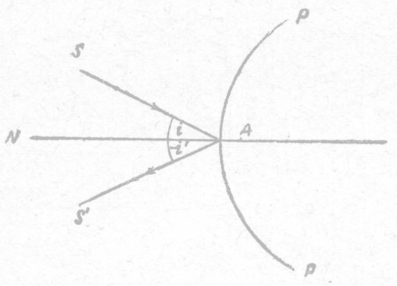

图 7

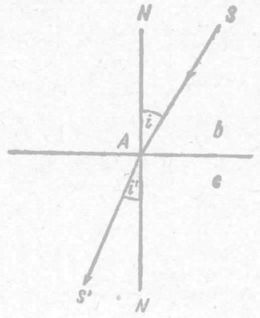

图 8

如果入射角和反射角由法綫按順針方向构成的，则其值为正，反之(逆时針方向)，则为負。在图7内，入射角 i 为正，反射角 i' 为負。很显然，如果入射光綫沿着 $S'A$ 方向，则反射光綫的方向将是 AS，这就是說，入射光綫与反射光綫的作用可以互換。

§8. 折射定律。折射率

当光綫由一种透明均匀的媒質进入另一种透明均匀的媒質內时，在两媒質間的拋光分界面上，光綫在它和第二种媒質的相遇点A处改变了方向，构成所謂光的折射（图8）。入射光綫和法綫的夹角 $SAN=i$ 是入射角；折射光綫和法綫的夹角$S'AN=i'$称为折射角。

折射定律确定，当光綫由一种媒質 b 进入另一种媒質 c 时，入射光綫、法綫和折射光綫在同一平面上；入射角 i 和折射角 i' 的正弦之比与这些角度的大小无关（只与两接触媒質 b 和 c 的性質有关），同时对于一定波长的光綫，当媒質的溫度和密度一定时，它是一个常量。角 i 和 i' 的符号規則与反射定律所采用者相同。这样，从图8有 $i>0$

和$i'>0$。所以根据定义可以写成：

$$\frac{\sin i}{\sin i'}= n_c^b. \qquad (2)$$

n_c^b之比叫做媒質c对于媒質b的相对折射率。

試驗証明，入射光綫和折射光綫的作用可以互换。因此，如果入射光綫沿着$S'A$方向以入射角i射入媒質c内，則媒質b内的折射光綫将沿着AS方向进行，而且与法綫构成一折射角$NAS=i$；若用n_b^c表示媒質b对于媒質c的相对折射率，則同样可以写成：

$$\frac{\sin i'}{\sin i}=n_b^c. \qquad (3)$$

将（2）和（3）比較就建立了下面的关系式：

$$n_c^b=\frac{1}{n_b^c}. \qquad (4)$$

关系式（4）指出，入射光綫和折射光綫的方向可以直接相反的变换，光綫的作用互换，但光綫与法綫的夹角仍旧不变。因此，几何光学里可以利用光程可逆的原理。

图9所示，为三种透明均匀的媒質，它們的分界面彼此平行。用符号a表示第一种与最末一种媒質。这样我們就有两个由媒質b和c組成的平面平行板，位于媒質a之間。由試驗可以証明，第一界面上的入射角i_1等于第三界面上的折射角i'_3。对于第一、第二和第三界面上的折射，按照公式（2）可以写出下列的等式：

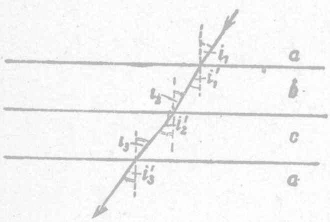

图 9

$$\left.\begin{aligned}\frac{\sin i_1}{\sin i'_1}&=n_b^a,\\ \frac{\sin i_2}{\sin i'_2}&=n_c^b,\\ \frac{\sin i_3}{\sin i'_3}&=n_a^c.\end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

将等式（5）逐項連乘，并注意到$i'_3=i_1$的条件，就求出三个相对折射率n_b^a、n_c^b和n_a^c的乘积等于1，即

$$n_b^a\cdot n_c^b\cdot n_a^c=1, \qquad (6)$$

由此得出

$$n_c^b=\frac{1}{n_b^a\cdot n_a^c}. \qquad (7)$$

考虑到（4）式，可以将（7）式写成：

$$n_c^b=\frac{n_c^a}{n_b^a}. \qquad (8)$$