**西 安 邮 电 大 学**

**毕 业 设 计（论 文）**

题 目： 基于脊形硅波导的全光100-10Gbit/s时分解压器

的设计与优化

学 院： 电子工程学院

专 业： 光电信息科学与工程

班 级： 光电1302

学生姓名： 马鸣

导师姓名： 惠战强 职称： 副教授

起止时间：2017年3月14日至2017年6月17日

**摘要**

为了进一步满足各种宽带业务对网络容量的要求，充分利用光纤的带宽资源，开发和使用新型光纤通信系统成为未来的发展趋势，其中采用多通道复用技术便是行之有效的方法之一。理论和实践都已证明，光复用技术作为构建信息高速公路的重要技术，在过去，现在和将来，对光通信系统及网络的发展和对充分挖掘光纤巨大传输容量的潜力，都将起到重要作用。

本文首先介绍了光时分复用的基本概述，包括时分复用的概念，OTDM的复用原理，OTDM解复用的原理，用到的技术，以及OptiSystem可视化仿真软件的使用。

OptiSystem是一款创新的光通讯系统模拟[软件包](http://baike.baidu.com/item/%E8%BD%AF%E4%BB%B6%E5%8C%85" \t "_blank)，它集设计、测试和优化各种类型宽带[光网络](http://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E7%BD%91%E7%BB%9C" \t "_blank)[物理层](http://baike.baidu.com/item/%E7%89%A9%E7%90%86%E5%B1%82)的虚拟光连接等功能于一身。最大的特点是强大的全面的[图形用户界面](http://baike.baidu.com/item/%E5%9B%BE%E5%BD%A2%E7%94%A8%E6%88%B7%E7%95%8C%E9%9D%A2" \t "_blank)控制光子器件设计、器件模型和演示。巨大的有源和无源器件的库包括实际的、波长相关的参数。参数的扫描和优化允许用户研究特定的器件技术参数对系统性能的影响。文中利用了OptiSystem构建了OTDM系统模型，利用该模型仿真分析，得到光脉冲发射器，光调制器，光延时，解复用的四波混频开关，波导设计等各方面的技术，为OTDM系统的学习提供了一个很好的软件平台。

理论知识是用来指导具体实践的.本文在深刻理解OTDM系统的基础上,利用OptiSystem强大的仿真功能，设计了许多具体的时分复用系统。

关键字：OptiSystem；OTDM；四波混频；仿真；脊形波导

**ABSTRACT**

In order to further meet the requirements of various broadband services to network capacity, and make full use of fiber bandwidth resources, developing and using new optical fiber communication system are becoming the future development trend, in which using multi-channel multiplexing technology is one of the effective methods. Theory and practice have proved that optical reuse technology, as an important technology to build information superhighway, in the past, present and future, the development of optical communication systems and networks and the potential for fully exploiting the huge transmission capacity of optical fiber will play an important role.  
 This paper first introduces the basic overview of optical time division multiplexing, including the concept of time division multiplexing, OTDM reuse principle, the principle of OTDM demultiplexing, the technology used, and the use of OptiSystem visual simulation software.  
 OptiSystem is an innovative optical communication system simulation software package, which combines design, testing and optimization of various types of broadband optical network physical layer of virtual optical connectivity and other functions into one. The biggest feature is the powerful comprehensive graphical user interface control of photonic device design, device model and demonstration. The huge source of active and passive devices includes the actual, wavelength-dependent parameters. The scanning and optimization of parameters allows the user to study the effect of specific device technical parameters on system performance. In this paper, the OptiSystem is used to construct the OTDM system model. Using the model simulation and analysis, the four-wave mixing switch, waveguide design and so on are used as the OTM for the optical pulse transmitter, optical modulator, optical delay and demultiplexing, which provides a good software platform for the learning of OTDM system.  
 Theoretical knowledge is used to guide the concrete [practice.This](https://wx.qq.com/cgi-bin/mmwebwx-bin/webwxcheckurl?requrl=http%3A%2F%2Fpractice.This&skey=%40crypt_250cc60d_b268c0e2f40225fa9160662ed42cda8e&deviceid=e689444795278423&pass_ticket=OGyZ0hnIs%252FcdAc7dSn8ofPrQ9ERkOmRy4aiYX3pdtZAsP3j2XIHqdQcG32JdDF22&opcode=2&scene=1&username=@652b32c315d8a558652e1d4d86d783f72393e6b41c949c91ded0c7f8065b21c7) paper, based on the deep understanding of the OTDM system, employs OptiSystem’s powerful simulation function, and designs a number of specific time division multiplexing system.

Keywords: OptiSystem；OTDM；Four-Wave Mixing；simulation；Ridge-waveguide

**引言**

如今的社会信息发展越来越快，处于这个信息爆炸的时代，越来越多的信息充斥着我们的生活，两千多年前的庄子曾经说过:”吾生也有涯，而知也无涯。以有涯随无涯，殆己”。两千多年前的庄子尚有如此感慨，现如今我们信息的传递早；已摆脱了原始的飞鸽传书，加急快报等。现今社会的光电子技术在这里面起到了决定性的作用，他的潜在作用了影响了整个半导体行业，其中著名的”摩尔定律”就是见证。”摩尔定律”讲述的是每18个月计算机的性能将翻一番的发展趋势。在二十一世纪初的时候，微处理器可以通过增加它的时间周期也就是所说的时钟摆动会发生很多问题，元器件的功耗急剧下降，损耗非常严重，导致处理器的热密度变得难以维持[1]。为了改进这个问题做了很多的努力与尝试，研究出了多处理器，但是多处理器之间的内部通信又出现了很大的问题，它的带宽极限又成为了另一个技术屏障。早期的计算机不像现在如此广泛和轻便，它那庞大的体积充斥着大量的晶体管，芯片上大量的布线。信息传递的时候，通过这些布线和晶体管产生大量的废热，也使得大量的信息被堵塞和延迟，这个对信息高速的传递是根本性的限制。

19世纪的光子学说，是物理学史上一个里程碑式的进步，光子的”波粒二象性”，为光子学的发展奠定了理论性基础。通过让光子代替电子，光子巨大的可用带宽可以克服微处理器的带宽限制，而且光子的光速响应速度具有无可比拟的优势，从而不必担忧电路延迟带来的限制。对于这样的应用，建立在绝缘体平台的硅光子制成的波导结构中，并且波导中导体损耗，介质损耗小，没有辐射损耗。

OTDM(时分复用)技术是指在光纤上进行时间分割复用，在一根光纤中只传输单一信号，它将通信时间分割成相等的间隔，某一固定的信道占据某一固定的时间间隔，这样各信道按照一定的时间顺序进行传输。随着光开关和光纤放大器的发展，对光时分复用的研究也越来越深入，利用这项技术实现高速率通信已成为可能[2]。

**1 绪论**

* 1. 研究背景及意义

1988年贝尔实验室是第一个完成OTDM实验点对点的实验室传输系统，当时的传输速率为4x4Git/s，1999年第25届ECOC会议中，日本NTT又实现最高速率为640Gbit/s的100kmOTDM传输实验，实验中示波器显示单通道最高速率为160119Gbit/s，在中国”九五”期间，国家”863计划”通信主题将光时分复用技术列为重点课题，中国国内许多高校也相继投入到高速光时分复用技术研究中。但是中国国内的研究同样的存在一些问题，如OTDM系统的稳定性还有待提高，缺乏观察40Gbit/s以上超高速光脉冲的示波器，信号分析仪等。

光波拥有很高的频率，利用光波作为信息的载体进行通信，具有巨大的优势。对石英光纤，其低损耗窗口总宽度约200nm，带宽为25000GHz。但是，实际光波系统中由于光纤色散等因素的影响，其通信速率受到限制。因此，如何充分利用光纤的频带资源，提高光波系统的通信容量，就成为了光波通信理论和设计上的重要问题。光复用技术的出现，及时解决了这个问题。

OTDM技术在城域网中和原来的WDM技术相比，虽然发展相对迟缓，但是它在城域网中也有自己的优势。OTDM可以提供比传统网络高得多的速率，在城域网方面，采用比特间插的OTDM时隙交换网络技术，实现资源的灵活调配，另外采用OTDM分组网络，与电的分组交换网络将代替电的电路交换网络一样，光的分组交换城域网将是城域网的一个发展趋势和方向。

* 1. OTDM系统目前发展现状

研究更高速率的系统并与DWDM相结合。OTDM的最高速率已达640Gbit/s，OTDM与DWDM相结合已实现了3Tbit/s的传输速率。OTDM实用化技术和比特间插的OTDM网络技术。欧洲一直在从事40Gbit/sOTDM系统和网络方面的研究工作，其中的一些关键器件已接近实用。

OTDM全光分组网络。国内利用熔椎型耦合器设计并制作了一个40Gbit/s的光时分复用器，并提出了一种利用镀膜的透镜组合来制作光时分复用器的方法，从理论上分析了该透镜组合的光线传输特性及其时分复用原理。

光时分复用(OTDM)技术是一种能有效克服电子电路带宽”瓶颈”充分利用低损耗带宽资源的扩容方案。与波分复用(WDM)系统相比，OTDM系统只需要单个光源，光放大时不受放大期增益带宽的限制，传输过程中也不存在四波混频等非线性参量过程引起的串扰，且具有便于用户接入，易于与现行的同步数字列（SDH）及异步传输模式（ATM）兼容等优点。

* 1. 研究内容

随着现代社会的发展信息越来越多，要求信息系统性能越来越好，但同时信息系统也越来越复杂;从另一个角度谈，光电子技术领域研究和产品开发的要求出发，缩短周期，降低成本，改善水质是必然要做的事情。在这样矛盾的条件下，只能通过强大的软件仿真和设计技术工具来实现。本质上讲，光电子学的仿真方法论不是那么容易系统的建立，所以除基本的仿真外，所有仿真问题都要涉及一些流程步骤。

1. 熟悉硅基微纳波导的结构，掌握波导设计方法。
2. 掌握硅基微纳波导中的非线性光学效应及应用，比如自相位调制，交叉

相位调制，四波混频等原理。

1. 在综合考虑拉曼效应、克尔效应和双光子吸收效应等三阶非线性效应引起的非线性极化强度和自由载流子效应引起的非线性极化强度的情况下，从麦克斯韦方程组出发推导了超短脉冲在硅波导中的非线性传输方程。
2. 学习optisystem软件，根据所设计波导色散特性，完成全光时分解压缩器的设计。

1.4 光电子系统仿真

1.4.1 光电子系统的一般仿真

光电子学经过这么多年的发展，光通讯系统的复杂性也是几乎与日俱增。这些系统的设计和分析包含了非线性装置及非高斯噪声源(non-Gaussian noise sources)，这个非常复杂和消耗时间，但同时又要严谨的科学计算，因此我们只有通过先进的软件工具来高效和有效的执行[3]。一般系统都会被分为3个步骤，建模，实验和分析[4]三个层面。

**2 硅的材料性质以及波导的结构**

硅材料是当前微电子工业的基础材料，因为其良好的性能，以及低廉的价格，在今后的很长时间内仍将是引导这一领域的发展。因此我们要相对微电子行业做深一步的研究，那么对硅材料的性质特性进行研究是很有必要的。

2.1 硅的晶体性质

硅材料是一种晶体材料，它在元素周期表中是第四主族半导体材料，其原子最外层分布着4个电子。固体的硅原子之间形成稳定的共价键，并且完全对成，因此使得它具有一系列稳定的特点。

研究晶体的时候晶体常数是一个重要参数，实验研究中，在室温条件下，高纯度的硅晶单体的晶格常数的值是aSi = 0.54310nm。由于硅的性质在它的衬底上生长外延生长硅合金时，形成的错位会改变晶体的性质，恶化材料的光学和电学性质。因此必须使用多层异质结构和优化的工艺技术，才能制成优良的晶体结构。

2.2 硅的电学性质

硅的电学特质十分重要，我们判断硅是不是作为电子器件的依据。电子和空穴的迁移率死表征材料的重要参数，它既是实际应用的基础同时又反映了物理特性。研究显示，界的粗糙程度和界面的散射是影响电子迁移率的主要因素，而在调制惨杂的异质结构场效应晶体管中，远程杂志散射和沟道中无惨杂的本底杂质散射是主要的机理。在杂志浓度不高太高的硅材料中，如果不考虑应变的影响，则晶格散射起主导作用，也就是说声学声子和非极性光学声子引起的散射起主导作用。硅材料的电学性质十分重要，在很多领域中都有突出的贡献。

2.3 硅的光学性质

硅材料能够应用在光子学方面，并且作为一种重要的集成平台，这个是和硅的光学性质分不开的，硅在光学方面的性质，具体表现在这些方面：

1. 硅作为一种半导体材料，自然存在禁带宽度。在常温下，硅在波长为1.1微米处的禁带宽度为1.12Ev，因此在最重要的通信的通信窗口波段1.3——1.7微米的范围内，是完全透明的。硅的带隙结构能使波长超过1.1微米截止波长的光谱成分透明传输，十分有利于将硅材料应用在通信领域。
2. 硅是目前能找到的最纯净的物质，从光学上讲，纯度越高损耗就越低，硅的高纯度性质使得人们可以利用它制作出各种低损耗和低色散的光波导器件。
3. 硅材料与CMOS工艺兼容，能够以硅材料为基础制造出硅基波导。与CMOS过程中用到的两种主要的衬底介质比较，硅材料在1.5微米波段的折射率很大，大概是3.5。大的折射率对比度特点非常有利于光的相互作用和光波导尺寸的控制，因此硅基波导器件具有很强的光束限制等特点。
4. 硅的非线性折射率是普通石英的200倍，拉曼增益系数是普通石英材料的3000倍且依赖于光的偏振特性。所以硅材料是良好的非线性光学材料，可以作为克尔效应和拉曼效应的研究载体。

在硅材料众多的光学性质中，折射率是硅材料的重要光学参数，它是由材料本身的性质决定的，也与光波的波长和能量有关。在研究中发现，在波长为0.89——2.48微米的范围内，硅的折射率随着波长的增加而减小，这种变化是单调的。除此之外，硅的材料性质还包括荧光特质，可以通过拉曼光谱来测定材料的荧光光谱。

硅晶体的晶体结构，能带结构，提纯的程度，电子和空穴的迁移率等特性使其非常适合于制作电子器件。随着深入的研究，特别是在外延生长技术和纳米加工技术的发展，相信在硅基光子学材料上一定会获得重大突破。

2.4 SOI材料的特性及应用

硅异基材料有很多，其中最重要的一种就是绝缘体上的硅(Silicn-On-Insulator,SOI)材料。SOI材料是种新型的硅基光电子集成材料，基于SOI结构上的器件将在本质上提高开关速度，降低功耗，从而实现高速低运耗运行。

SOI技术通过在顶层硅和背面衬底硅之间引入一埋层氧化层，在绝缘体上形成半导体薄膜，这种特殊的结构使得SOI材料具有一些晶体硅远远无法比拟的优点。这些优点体现在:低功耗，SOI材料能够降低百分之三十到百分之七十的能量消耗。实现了元器件的介质隔离。高频特性好。耐高温能力强。

2.4.1 SOI材料的制备方法

材料和技术一直都是相辅相成，同样SOI材料是SOI技术基础，SOI技术的发展依赖于SOI材料的不断进步，缺乏低成本，高质量的SOI材料一直是制约SOI技术进入大规模工业生产的首要因素。

键合-背面腐蚀技术的原理较为简单:将两个便面氧化的硅片键合在一起，然后将其中一个硅片通过化学腐蚀活着机械化学共同作用的研磨抛光工艺过程将硅片厚度缩减至适合于SOI器件应用的厚度，另一个硅片作为机械支撑衬底。

注氧隔离技术的主要过程包括氧注入和高温退火两个基本过程，这里所指的氧注入是指将氧离子注入硅片表面下形成二氧化硅埋层，而高温退火工艺是为了改善SOI材料的顶层硅的单晶质量，减少位错密度，并得到原子级的硅-二氧化硅陡峭界面。

2.4.2 SOI的主要制备方法的比较

介绍了大致SOI材料制备的主要方法，但是他们各自都有自己的优缺点，而这些方法制备的材料也不尽相同，表2.1总结了各种材料制备的优缺点。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 注氧隔离技术 | 键合技术 | 注氧键合技术 |
| 晶片 | 单晶片 | 双晶片 | 双晶片 |
| SOI膜厚 | 薄 | 厚 | 厚度任意可控 |
| 隐埋氧化层厚度 | 薄 | 厚度可调 | 厚度可调 |
| SOI均匀性 | 优良 | 一般 | 优良 |

表2.1 各种SOI材料制备方法的特点比较

2.4.3 SOI材料的应用与发展趋势

SOI材料作为一种光学性能优良的结构材料，SOI材料可以用来制作硅基集成光电器件，用于高速宽带网络连接。目前，已经利用SOI技术和材料实现了大量光学波导无源器件的制作。此外,SOI材料还应用于微机电系统器件。

基于SOI系统的光电子集成材料的核心技术是SOI波导器件，SOI波导的导波层硅层和包层二氧化硅的折射率差别很大，由它们组成的波导对光的限制作用很强。因此，想要在平面SOI波导中实现单模传输，导波层的厚度要小于0.3微米，为了解决这个问题，Soref提出了SOI矩形脊形波导的单模传输条件。

2.5 SOI波导的结构和性质

SOI材料在光电子学技术中应用核心就是波导，SOI波导是在SOI材料的基础上加工而制成的，它的尺寸在亚微米级。图2.2给出了典型的板层结构SOI波导截面示意图。

**空气**

**二氧化硅涂层**

**硅芯层**

**掩埋的二氧化硅层**

**衬底硅**

图 2.2 典型的板层结构SOI波导截面示意图

它的结构可以分为如下几层：芯层，为核心层，其材料为硅，在波长为1550nm处其折射率大约为3.5；衬底层，采用硅材料来支撑整个波导结构；涂覆层，SOI波导结构的涂覆层材料为二氧化硅，在波长为1550nm处其折射率约为1.46；涂覆层上面就是空气层。

2.5.1 波导常用的结构

常见的波导结构分为条形波导，脊形波导，光子晶体波导，沟波导，分别如图2.3所示：

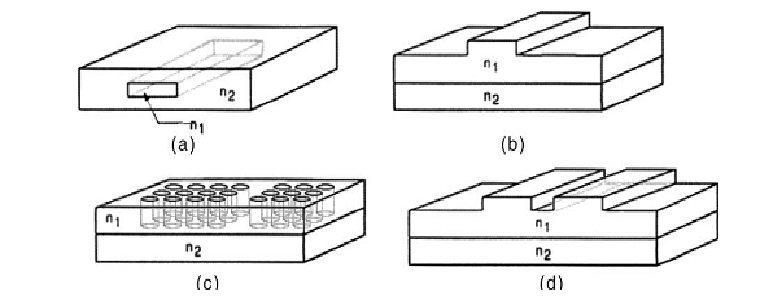


图 2.3 硅波导常见的四种结构(a)条形波导;(b)脊形波导;(3)光子晶体波导;(4)沟波导

一般而言，SOI波导中可以传输多个模式，但是只要结构设计合理，就可以实现单模传输。对于脊形波导而言，只要波导结构的集合参数满足(1.1),就可以支持单模传输

(2.1)

式中，为波导的宽度和高度之比；为波导的蚀刻深度和高度的比值。

2.5.2 脊形波导的优势

在脊形SOI波导结构中，横向尺寸可以稍微扩大，当光在波导中传输时，波导内的高阶模式就被辐射掉了，只余下基模。所以，脊形SOI波导内传输的单模是一种准单模形式。

SOI波导采用脊形波导结构具有以下优点：一是自由载流子可以更快地向波导结构的侧翼消散，可以减小自由载流子效应的影响；二是脊形波导结构有利于金属p-i-n结构与波导结构结合在一起，可以十分方便地对波导结构进行电压加载。

**3 光波导的一般理论和研究仿真**

现代的光子学理论经过了很多代物理学先驱的反复推证，直到德布罗意提出”波粒二象性”，这个持久的争论才结束。光就是一种电磁波，那么它首先就是一种电磁振荡。电磁震荡包括电场和磁场两方面的振荡，因此，光场按照工程惯例以电场强度和磁场强度来表征，可以写为

= () (3-1)

光场既是位置的函数，又是时间t的函数。

一个单一频率的简谐电磁振荡，通常可表示为

= () (3-2)

其中,是复矢量，包括了方向，幅度和相位关系。理想中的相干单色光，即光场中每点的场分量都有固定的方向，稳定不变的频率和稳定的相位关系。

3.1 光频的麦克斯韦方程

麦克斯韦根据前人的总结关于电磁场的研究提出了完整直观的电磁场方程，开创了光学的新纪元，目前光通信，光传输很多领域中都是以麦克斯韦方程为基础。

在介质中基本的麦克斯韦方程和瞬态的，就是某一时刻，某一位置上电磁场强度**和**磁场强度所满足的普通适应方程是：

(3-3)

第一个方程表示，在电磁场中，电场强度的场是一个有旋场，产生这个旋律的源是同一点上磁感应强度随时间的变化率，也就是我们之前的了解”磁场的变化引起电场”。第二个方程表示，在磁场中，磁场强度是一个有旋场，产生这个旋度的源是同一点上电位移矢量随时间的变化率和电荷的运动，也就是俗话说的”电场的变化和电荷的运动引起了磁场”。第三个方程表示，电位移矢量的场是一个有源场，产生这个散度的源是电荷密度 。第四个方程表示，磁感应强度的场是一个无源场，自然界中没有“磁荷”存在。这四个方程中，前两个方程是基本的，后两个方程可以利用旋度场的散度恒为零及电荷不灭定律

(3-4)

3.2 亥姆霍兹方程

对麦克斯韦方程进行简单的数学运算，就将和互相关联起来的方程转化为各自独立的方程，利用

(3-5)

立即可得到亥姆霍兹方程

(3-6)

(3-7)

方程中*k* = 为真空中的波数，为波长；。由方程(3-6)和(3-7)可以看出，方程的左边包括齐次部分和非齐次部分。而是否为零是该方程是否为齐次的关键。如果在所考虑的那一部分光波导中，介质为均匀分布(=0)，或近似均匀分布，那么该方程就转化为齐次的方程

(3-8)

3.2 模式的概念

正规光波导是最主要的一类光波导，由正轨光波导引出的模式概念，是光波导最基本的概念。

说到正轨光波导，什么叫正规光波导呢，大致就是光波导的折射率延向不变，那么他就是正轨光波导，数学表达式，可表达为

(3-9)

那么这样就可以得到这样的结论，在没有偏振相关损耗的正轨光波导中，选择合适的坐标系，它的光场总可以使用分离变量法分离开来，也就是博到你该方程的特解，即

() = (3-10)

那么光场沿着空间的分布我们就可以这样表示：

() = (3-11)

式中， 为位移常数，表示这种光场具有波动性;与为模式场，表示光场()沿着截面的分布，模式场是矢量场，具有立体三维视图，它包括方向，幅度和相位

关于模式场是否存在，主要有两种方式，第一种是将分离成，接着求出。而另外一种方法相对就比较麻烦了，它是将公式(3-11)直接带入亥姆霍兹方程，验证其正确性，带入可得下面这样的公式：

(3-12)

可以得到

方程组(3-13)和(3-14)是一个只有两个未知数的偏微分方程。我们根据偏微分方程理论，给出的边界条件，可以得到他的特征解

() = (3-15)

那么上面得到的这个方程的一个特征解就是一个模式。

3.2 模式的分类

我们根据模式在空间中的分布，通常将它分为三类：

1. TEM模：模式只有横向分量，而无纵向分量
2. TE模或TM模：模式只有一个方向
3. HE模活着EH模

根据研究得到光波导中不可能存在TEM模，TEM模只是存在理论中的，而HE模与EH模在应用中比较少，目前不对它做过多的讨论与研究，只说TM模和TE模。

3.2.1 TE模

由于TE模的纵向分量 = 0 ,从模式场中可以得到

(3-16)

上面的式子我们可以得到：电场与磁场的横向分量相互垂直;在,,三者成右手螺旋准则的规定下，和同相位;参数具有阻抗的量纲，定义为TE模的波阻抗。

o z

图3-1 TE模电场与磁场的横向分量

3.2.2 TM模

由于磁场纵向分量= 0,我们从模式场中得到

(3-17)

上式表明：电场与磁场的横向分量相互垂直；在， ，三者符合右手螺旋定则的情况下，与同相位，幅度大小成比例。比例系数具有阻抗的量纲，也就是所说的波阻抗。

3.2 波导的材料色散

波导的很多特性我们都可以通过数学公式将它具体的量化出来，这些特性包括损耗和色散，我们可以用下面的式子来计算出来。

波导中的材料二氧化硅的色散我们可以用Sellmerier方程来描

(3-18)

在方程中;为第阶谐振波长;为谐振强度。

但是硅材料它的色散方程就是比较特殊了，比之前的繁琐一点，它的修正表方程表达式为:

(3-19)

式中: = 11.6858，A=0.939816，B=0.00810461，=1.1071。

从公式(3-18)得到的方程后来人们发现还是具备相应的缺点，并不能完整的表达材料的色散，因此后来又提出了另一种色散的模式，如下所示:

(3-20)

式中，为光子能量；，，，

还有一种其他的方程来代替Sellmerier方程，我们在常温下还可以使用Herzberger色散方程来表示其色散定量的描述，

(3-21)

式中: ，在常温下，。