http://pmse.scu.edu.cn

应用于高密度多层光存储的聚合物基存储介质

段宇豪，杨凤英，丁奕同，熊 英，郭少云

（高分子材料工程国家重点实验室(四川大学) 四川大学高分子研究所 四川省橡塑材料复合成型技术工程实验室，四川 成都 610065）

摘要：飞秒微爆多层光存储是一种新型光存储技术，它通过在介质内部记录多层数据，成倍地扩充了光盘容量极限，有望解决传统光盘容量过低的问题。但由于飞秒微爆多层光存储信息记录过程受到多种材料因素的共同影响，导致长期缺乏介质材料选择的理论依据。文中选择误码率作为光存储性能的关键指标，测试对比了不同光学树脂的光存储性能。采用相关系数量化了材料的力学性质、热性质、光学性质、介电常数和高分子链结构与光存储性能之间的依赖关系，从而揭示出光学树脂的高分子链结构才是影响光存储性能的决定性影响因素。基于此发现，在聚甲基丙烯酸甲酯材料中实现了60层高密度多层光存储信息读写测试，容量密度达到1600 Gbits/cm^3。

关键词：光存储；存储介质；飞秒激光；多光子吸收

中图分类号：TP333 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）07-0112-11

随着人类社会迈入大数据时代，全球每年产生的数据总量飙升。海量数据存储持续消耗着大量的能源，2022年国内数据中心的耗电量已经超过北京市用电量的2倍[1~3]。光存储技术利用存储介质的物理化学结构变化存储信息，数据存储具有永久性，因此只在信息记录或读取时消耗电力[4~6]。这种“离线存储”的特点，使得光存储技术在冷数据的存储上独具低能耗、低成本、长寿命和高安全性的优势[7]。

但目前光存储技术的商业化产品光盘过低的容量严重限制了其应用，导致数据存储市场上光盘的市场占比逐年下降。飞秒微爆光存储技术是一种新型光学技术，它利用飞秒脉冲在透明材料内部诱导等离子体微爆炸，将爆炸产生的微孔作为信息符记录数据[8~10]。由于产生等离子体的多光子吸收发生的概率非线性地依赖于光强，材料对飞秒脉冲的吸收被限制于焦点附近光强极高的区域，在聚焦光路的其他位置并不发生。这使得多光子吸收具有极高的空间分辨率和空间选择性。因此，飞秒微爆光存储技术能够在材料内部便捷地记录多层数据，成倍地扩充光盘容量，使得光存储有望成为大数据长期存储的解决方案。

飞秒微爆光存储技术信息记录的实质是飞秒脉冲和材料的相互作用过程。如Fig.1(a)所示，飞秒微爆产生的微孔具有多层次结构，包括中心的空穴、等离子体冲击波挤压周围材料产生的致密区和扩散热扭曲周边材料性质的热作用区域[11]。这样的多层次结构直观地表明，飞秒微爆光存储技术的信息记录过程是由多种材料性质共同影响的。如Fig.1(b)所示，材料的光学性质影响飞秒脉冲在介质材料中的传播，非线性吸收能力影响材料对激光能量的沉积；介电常数影响自由电子最终积累的密度，从而影响等离子体爆炸的剧烈程度；力学性质中的弹性模量影响冲击波停止作用的区域，影响中心空穴的尺寸；热性质影响材料熔融二次冷凝的行为和热作用区域的大小[10,12]。多因素综合作用的信息记录过程使得飞秒微爆光存储技术长期缺乏介质材料选择依据，阻碍着飞秒光存储技术的发展和实际应用[13]。

为了明确适配于飞秒微爆光存储技术的存储介

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0129
收稿日期：2024-02-27
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52173042）
通讯联系人：熊英，主要从事聚合物结构与性能调控、高分子材料老化研究，E-mail: xiongying@scu.edu.cn

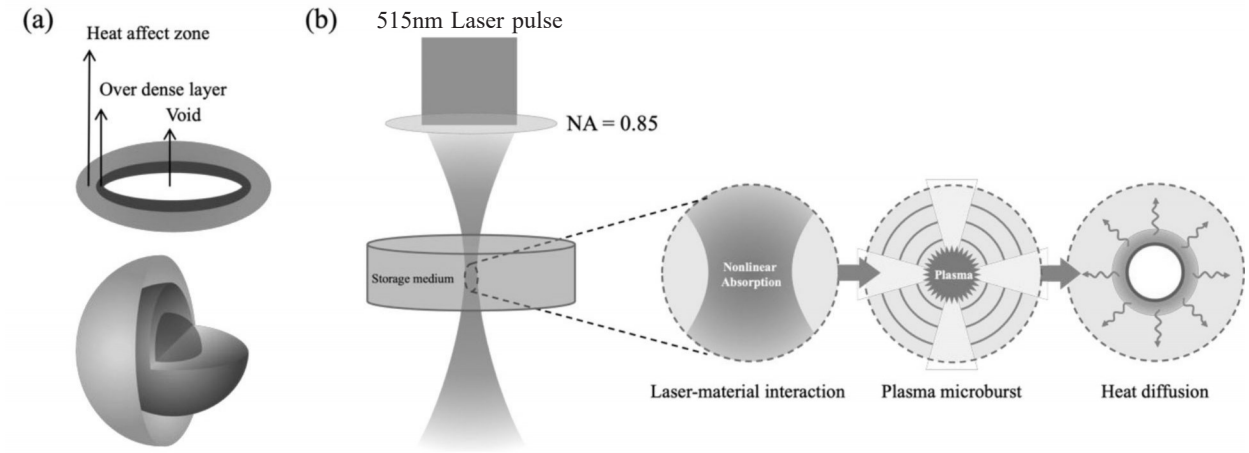


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the multilevel structure of bits; (b) schematic diagram of the data recording mechanism of femtosecond microburst optical data storage

质的材料选择依据，本文研究了多种光学树脂和光存储性能之间的构效关系。选择误码率作为关键性能指标，测试对比了不同光学树脂的光存储性能，并采用相关系数量化分析了各类材料性质与光存储性能之间的依赖关系，明确了影响材料光存储性能的决定性因素是高分子的链结构。基于此研究发现，文中以聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）为基材制备了光存储介质，并成功进行了60层多层信息读写测试，材料存储密度达到1600 Gbit/cm^3。

1　实验部分

1.1　材料与仪器

5种不同牌号的PMMA：分别由5个公司提供（包括日本旭化成、法国、日本三菱、英国Goodfellow和四川龙华光电公司）；3种苯乙烯链段含量不同的苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯共聚物（SMMA）：采用苯乙烯链段含量命名SMMA，如SMMA-10%代表苯乙烯链段质量分数为10%的SMMA，SMMA-10%，SMMA-20%和SMMA-30%均来自德国Styrolution公司；聚苯乙烯（PS）：牌号PG-33，中国台湾奇美公司，密度1.04 g/cm^3，熔体流动速率8.0 g/10 min（200 ℃/5.0 kg）；聚碳酸酯（PC）：牌号H-4000，日本三菱公司，密度1.20 g/cm^3，熔体流动速率63 g/10 min（300 ℃/1.2 kg）；聚对苯二甲酸乙二醇酯（PETG）：牌号6763，伊士曼公司，密度1.27 g/cm^3；环烯烃均聚物（COP）：牌号1060R，日本Zeonor，密度1.01 g/cm^3，熔体流动速率60 g/10 min（280 ℃/21.18 N）；环烯烃共聚物（COC）：牌号APL6013T，日本三井化学，密度1.04 g/cm^3，熔体流动速率15 g/10 min（260 ℃/2.16 kg）。

转矩流变仪：RM-200C型，哈尔滨哈普电气技术有限责任公司；模压成型机：R3212型，武汉启恩科技发展有限公司；塑料注射成型机：MA600II/130，海天机械有限公司；拉伸试验机：Insrton 5567型万能材料试验机，美国Instron公司；热重分析仪：TGA/DSC3+/1600，瑞士梅特勒-托利多公司；宽带介质阻抗弛豫光谱仪：BDS，Concept 50型，德国Novocontrol公司；凝胶渗透色谱仪：HLC-8320GPC型，日本东曹株式会社。

1.2　实验过程

实验中涉及的光学树脂样品由2种热成型方式制备得到，光存储性能测试、介电常数测试、热性质测试和光学性质测试均采用热压成型样品，力学性能测试采用注塑成型样品。热压成型样品的制备流程包括原料干燥、密炼熔融共混和模压机热压成型。热成型试样中不同聚合物采用的加工成型温度不同。PMMA，SMMA，PETG，PS，COC和COP热压样品均采用以下加工流程：加工成型之前，原材料鼓风烘箱中80 ℃干燥4 h，采用转矩流变仪将原材料熔融共混后，利用模压成型机热压制备得到热成型样品。熔融共混的工艺参数是210 ℃，采用50 r/min转速熔融混合6 min。利用模压成型机制备PMMA样品，模压成型的工艺参数是195 ℃，预压压力1 MPa，预压时间180 s，模压压力10 MPa，模压时间

10 min。PC材料原材料干燥温度120 ℃，密炼温度260 ℃，热压温度240 ℃，其余加工参数与其他材料相同。注塑样品使用塑料注射成型机加工成型，PS和PETG注塑温度220 ℃，PMMA，SMMA，COC和COP注塑温度240 ℃，PC注塑温度260 ℃。

1.3 测试与表征

1.3.1 拉伸性能测试：采用万能材料试验机按ASTM D638标准测试样品的拉伸性能。样条为哑铃型样条，样品标距为25 mm，测试温度为室温(25±2) ℃，拉伸速度为5 mm/min，每组样品测5个平行样。

1.3.2 热重分析：用热重分析仪进行热重分析。样品在50 mL/min的氮气气氛中，以10 ℃/min的升温速率从30 ℃升温至900 ℃，记录热重曲线。

1.3.3 光学性能测试：按照ASTM D1003-61标准，采用上海精密科学仪器有限公司的WGT-S透光率/雾度测定仪测定。使用平均波长为550 nm的国标C光源。每个试样取3个不同点测试，测试结果取平均值。

1.3.4 介电性能测试：使用宽带介质阻抗弛豫光谱仪测试了光学树脂10^6 Hz频率下的介电性能。

1.3.5 相对分子质量测试：用凝胶渗透色谱仪，对5种牌号的PMMA进行了相对分子质量测定。采用TSK gel super HZM- M 6.0*150 mm和TSK gel SuperHZ3000 6.0*150 mm这2根色谱柱串联。示差折光检测，流动相为四氢呋喃（THF），流动速率为0.6 mL/min，温度为40 ℃，标样为聚苯乙烯。

1.3.6 光存储性能测试：信息符的记录和读取均采用暨南大学实验室搭建的飞秒微爆光存储信息记录读取系统。系统所用的飞秒激光脉冲波长515 nm，重复频率1 kHz，脉冲持续时间484 fs，线宽2.86 nm，物镜放大倍率100倍，物镜的数值孔径为0.85。单层信息符记录的深度为45 μm。信息符的读取采用共聚焦显微镜原位读取。

1.3.7 开孔Z扫描分析：*Z*扫描是一种非线性光学表征方法，用于测量入射激光脉冲产生的吸收变化。在*Z*扫描过程中，一束高斯光束穿过样品入射。改变样品在光轴上的位置，测量远场相对于焦点区域的透射光，从而得到*T-Z*函数曲线。对于非线性光学材料，吸收系数如式(1)所示，

$$\alpha(I)=\alpha+\beta(I) \tag{1}$$

式中：α——线性吸收系数；β——取决于激光强度的非线性吸收系数，cm/GW。入射光束在出口表面的光强分布可表示如式(2~4)，

$$I_r(z,r,t)=\frac{I(z,r,t)\,e^{-al}}{1+q(z,r,t)} \tag{2}$$

$$q(z,r,t)=\beta I(z,r,t)L_{eff} \tag{3}$$

$$L_{eff}=\frac{1-e^{-al}}{a} \tag{4}$$

式中：$I(z,r,t)$——光强分布；L_{eff}——有效长度。在远场测量到的传输功率$P(z,t)$由式(3)在z和r上的积分得到，其值为

$$P(z,t)=P_i(t)e^{-al}\,\frac{\ln[1+q_0(z,t)]}{q_0(z,t)} \tag{5}$$

$$P_i(t)=\frac{\pi w_0^2 I_0(t)}{2} \tag{6}$$

$$q_0(z,t)=\frac{\beta I_0(t)L_{eff}z_0^2}{z^2+z_0^2} \tag{7}$$

$$z_0=\frac{\pi w_0^2}{\lambda} \tag{8}$$

式中：$P_i(t)$——样品内的瞬时输入功率；w_0——焦点（z=0）处的光束腰半径；I_0——焦点处的轴向输入强度；z——样品位置；z_0——瑞利范围；λ——激光波长。对于时间高斯脉冲，式(5)可以通过时间积分得到归一化能量透射率，

$$T(z,S=1)=\frac{1}{\sqrt{\pi}q_0(z,0)}\cdot\int_{-\infty}^{\infty}\ln[\,1+q_0(z,0)e^{-\tau^2}]\mathrm{d}\tau \tag{9}$$

$|q_0|<1$当时，该透射率可以用峰值光强的求和形式来表示，以便进行数值评估，

$$T(z,S=1)=\sum_{m=0}^{\infty}\frac{[-q_0(z)]^m}{(m+1)^{\frac{3}{2}}} \tag{10}$$

拟合曲线和非线性吸收系数（β）是根据式(11)对实验数据进行理论拟合得到的。使用数据记录波长515 nm的飞秒激光作为Z扫描的测试光束。为了提高试验数据的可靠性，对每个样品进行测量，测试光束入射表明分别为试样的上表面和下表面。Z扫描曲线中的圆形数据点和方形数据点分别代表两侧实验测试得到的数据，它们的重叠证明了

数据的可靠性。

2　结果与讨论

2.1　聚合物基存储介质的高密度光存储性能

在不同光学树脂上进行了500 nm×500 nm点间距高密度信息符点阵记录测试。测试结果表明,材料种类对介质的光存储性能有较大影响。如Fig.2(a)所示,各个光学树脂的信息符点阵的共聚焦显微镜图片首先直观地表现出,在PMMA,SMMA-10%,SMMA-20%和PETG材料上所记录的信息符的信号均匀,相邻信息符间隙明显,能够清晰地分辨单个信息符,表明在这些材料上记录的信息符结构均匀且尺寸较小,材料表现出较好的光存储性能。而在SMMA-30%,PC,PS,COC和COP材料上,相邻信息符融合在一起的缺陷明显,表明在这些材料上记录的信息符尺寸偏大。同时,在PC,COC等材料中,单个信息符信号强度过高的"亮点"区域和存在多个信息符缺失的"暗场"区域频繁出现,说明在这些材料中记录的信息符结构一致性较差,材料表现出较差的光存储性能。

2.2　聚合物基存储介质材料性质与光存储性能的依赖关系

如Fig.2(b)所示,对共聚焦显微镜图片进行灰度二值化处理,统计了在不同光学树脂上记录的信息符点阵的误码率。误码率(Bit error rate, BER)是衡量在材料中存储数据准确性的一个重要指标,计算公式如式(11),

$$\mathrm{BER} = 1 - \frac{b_\mathrm{f}}{b_\mathrm{t}} \tag{11}$$

式中:b_f——实际缺失的信息符;b_t——理论上记录

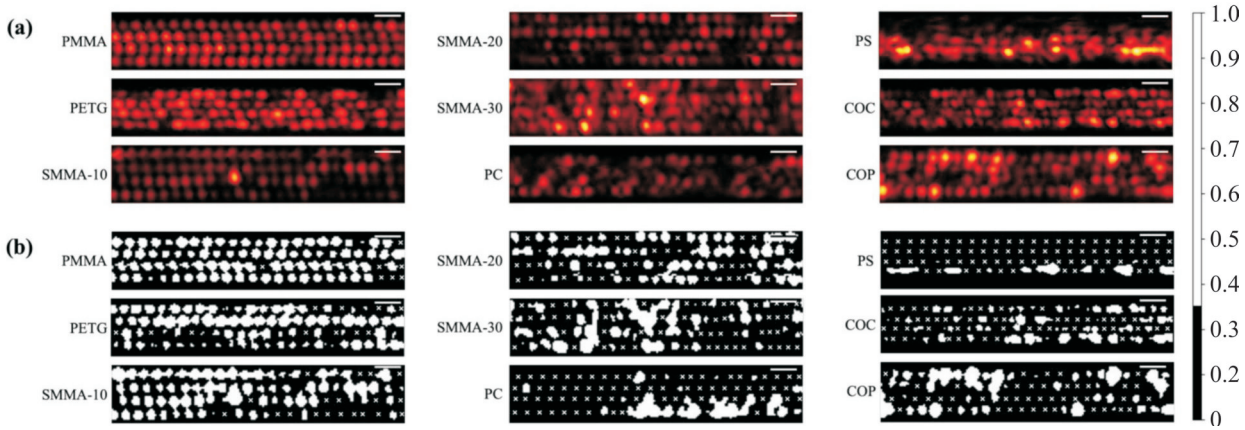


Fig. 2 (a) confocal microscope images of the 500 nm × 500 nm bit spacing 25 × 4-bit array recorded on different optical resins; (b) grey scale processing results (white"×" represents unsuccessfully recorded bits, scale bar = 1 μm)

Tab. 1 Statistical result of BER, ester bond mass fraction and benzene ring mass fraction for optical resins

Polymer	BER/%	Ester bond mass fraction/%	Benzene ring mass fraction /%
PMMA	7.4	44.0	0.0
PETG	11.5	45.4	39.2
SMMA-10%	22.2	39.6	7.4
SMMA-20%	35.1	35.2	14.8
SMMA-30%	52.8	30.8	22.2
PC	71.6	17.3	59.8
PS	85.0	0.0	74.0
COC	39.6	0.0	0.0
COP	43.8	0.0	0.0

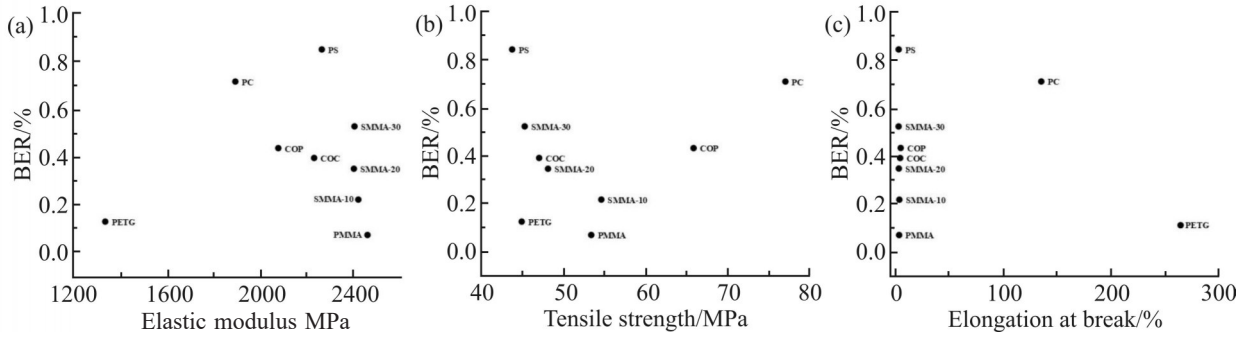


Fig. 3 (a) Young's modulus, (b) tensile strength and (c) elongation at break of various types of optical resins

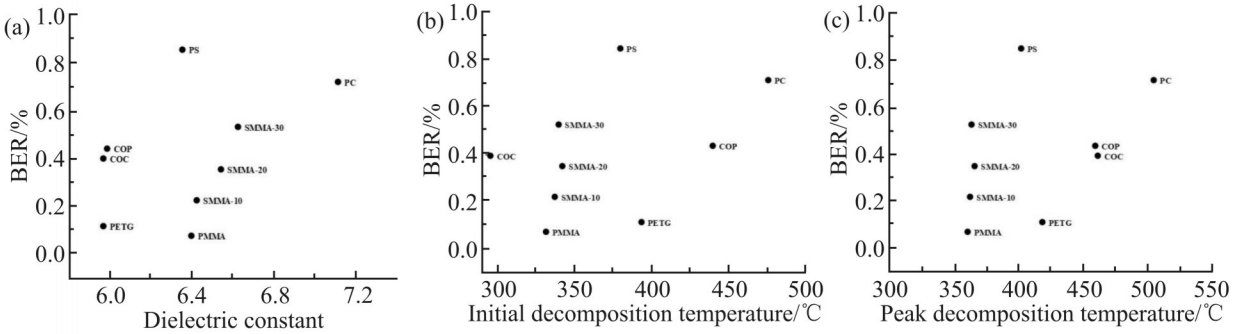


Fig. 4 (a) Dielectric constant, (b) initial decomposition temperature, (c) peak decomposition temperature of various types of optical resins

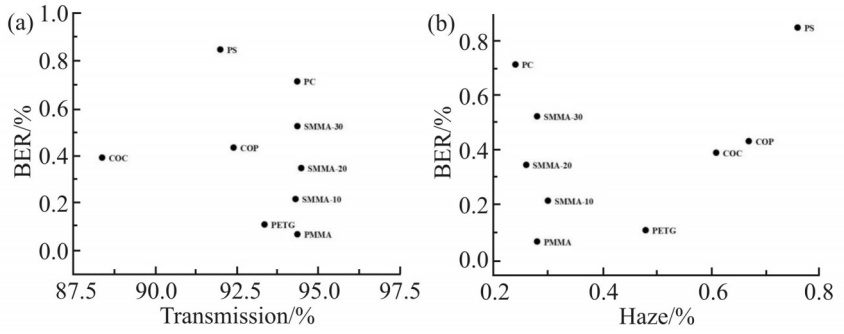


Fig. 5 (a) Transmission and (b) haze of various types of optical resins

的信息符总数。点阵误码率越低，代表在材料上进行高密度信息记录和读取时数据的准确性和可靠性越高，表明材料的光存储性能越好。误码率、光学树脂高分子链中酯键质量分数、苯环质量分数统计结果如Tab.1所示。对比不同光学树脂，可以初步发现，酯键含量越高的光学树脂误码率越低，苯环含量越高的树脂误码率越高。其中，PMMA，SMMA-10%，SMMA-20%，SMMA-30和PS的酯键含量依次降低而苯环含量依次增加，结果是在材料上记录的信息符点阵的误码率也随之增加，直观地证明了酯键含量和苯环含量会影响材料的光存储性能。

本文进一步测试了影响信息记录过程的各类材料性质，包括力学性质（弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率）、介电常数、热性质（起始分解温度和峰值分解温度）、光学性质（透过率和雾度），并将各类材料性质与误码率作图，观察是否存在明显依赖关系，如Fig.3~Fig.5所示。结果发现，各类材料性质和误码率之间存在明显的依赖关系。

本文采用相关系数量化了各类材料性质、高分子链中酯键含量和苯环含量与误码率之间的依赖关系。相关系数用于度量2个目标变量之间的线性依赖关系，计算公式如式(12)，

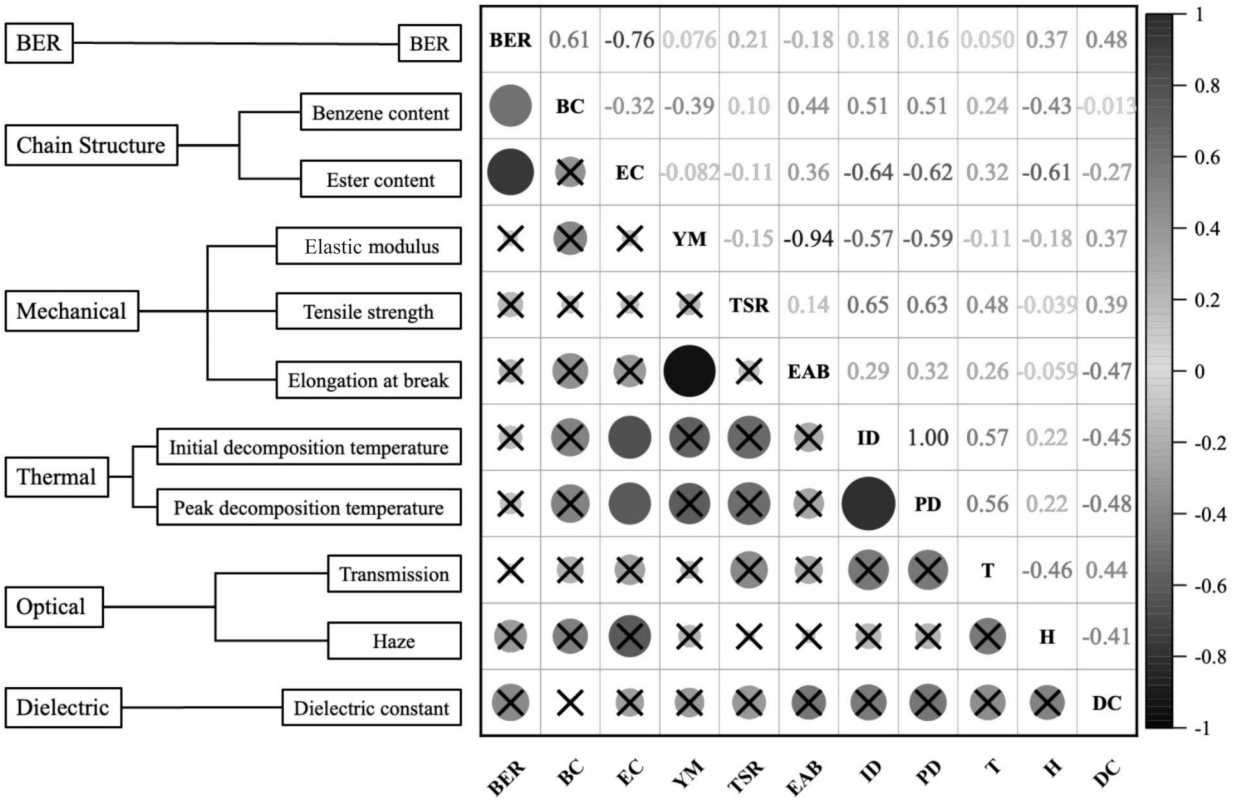


Fig. 6 Correlation plot between different material properties and BER of different optical resins

$$r=\frac{\sum_{i=0}^{n}(X_i-\overline{X})(Y_i-\overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\overline{Y})^2}} \tag{12}$$

式中:X_i和Y_i样品i的2个目标变量;$\overline{X}$和$\overline{Y}$样品集中2个目标变量X和Y的平均值。相关系数是介于-1到1的一个值。相关系数越接近0,代表2个变量之间的线性相关性越弱,相关系数越接近于-1或1,代表2个变量之间的正线性依赖关系或负线性依赖关系越强。采用光学树脂的性能测试结果的集合判断各类材料性质和光存储性能之间是否存在依赖关系是一个假设检验实验,其中零假设是材料性质与光存储性能之间无依赖关系,备择假设是材料性质与光存储性能之间存在依赖关系。显著性水平p值是衡量2个变量之间的依赖关系是否具有统计显著性的统计学参数。p值代表在零假设(变量之间无依赖关系)为真的情况下,得到与样品集相同或更极端的结果的概率。如果p值小于通常为0.05的显著性水平值,那么可以认为零假设是错误的,并认为备择假设(变量之间具有依赖关系)成立[14]。

基于不同光学树脂材料性质测试结果和光存储性能测试结果,计算得到的相关系数矩阵如Fig.6所示。相关系数的计算结果如矩阵上三角所示。关系矩阵中第1列的圆代表着光学性质的高分子链结构、力学性质、热性质、光学性质、介电常数与误码率之间的依赖关系。圆的大小映射相关系数绝对值的大小,圆越大代表线性依赖关系越强。根据p值判断依赖关系是否具有统计学显著性,若不具有统计学显著性,则在下三角中的圆上标记“×”。结果表明,在各类材料性质中,高分子链结构中的酯键质量分数和苯环质量分数与误码率之间的相关系数最大,分别为0.71和-0.74,代表酯键质量分数与误码率之间存在较强的负线性依赖关系,苯环含量与误码率之间存在较强的正线性依赖关系。此外,在所有材料性质中,有且仅有酯键质量分数,苯环质量分数与误码率之间的依赖关系具有统计学显著性。而材料的力学性质、介电常数、热性质和光学性质与误码率之间的相关系数绝对值较低,且不具有统计学显著性,表明没有明显的依赖关系。这证明在各类材料性质

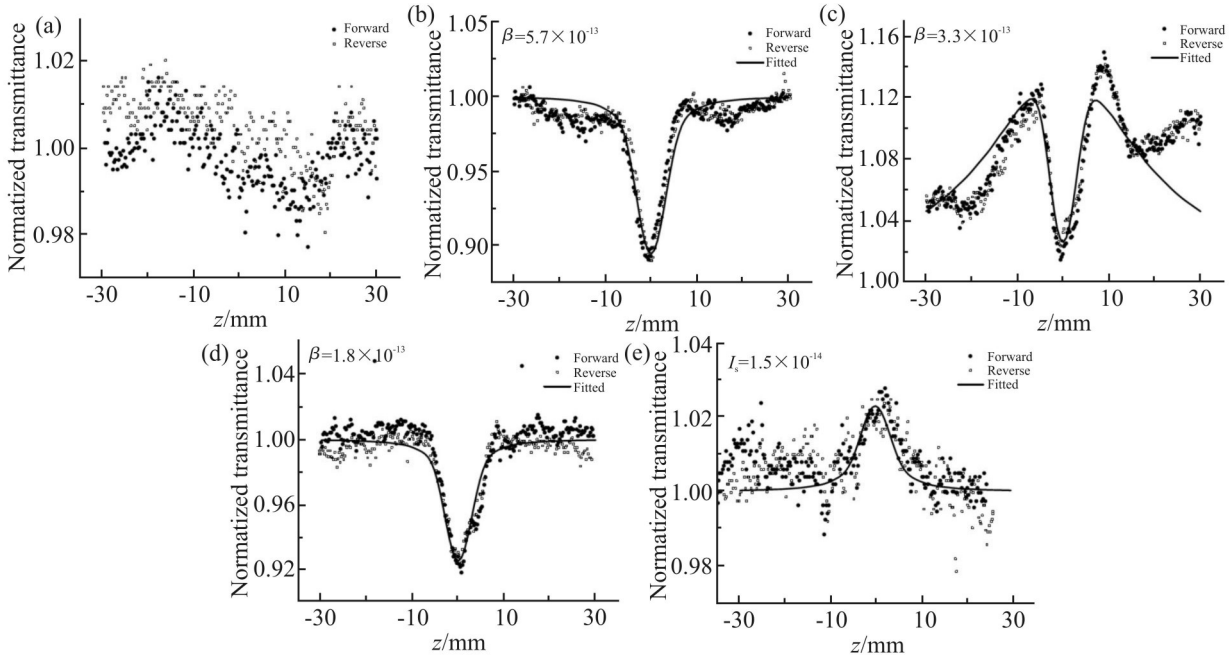


Fig. 7 Z-scan curves of (a) PMMA, (b) PS, (c) PC, (d) SMMA-20% and (e) COP

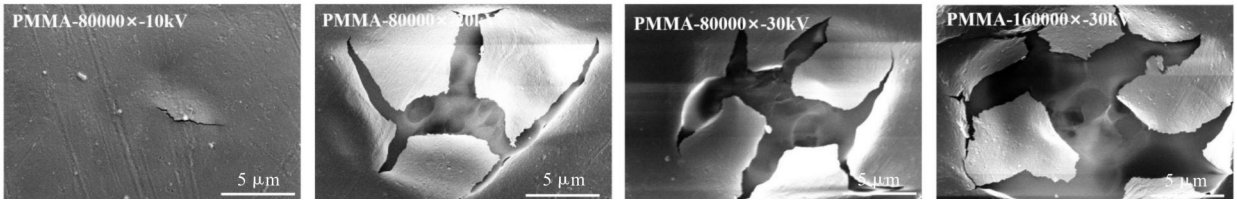


Fig. 8 SEM images of PMMA after high energy electron beam

中，高分子的链结构才是影响材料光存储性能的决定性因素。

2.3 聚合物基存储介质的多光子吸收

在基于多光子吸收的多层光存储技术中，更高的非线性吸收系数有利于减小信息符尺寸提高存储密度，因此也需要考虑到不同的光学树脂的非线性吸收系数的差异对材料光存储性能的影响。本文采用开孔*Z*-scan测试了不同光学树脂的非线性吸收系数。如Fig.7所示，PMMA的数据点发散，说明材料在测试条件下未表现出明显的非线性吸收行为。而PC，PS，COP和SMMA-20%材料的数据点均存在峰，开口向上的峰谷代表非饱和吸收的非线性吸收行为，开口向下的峰谷代表饱和吸收的非线性吸收行为。含有苯环的材料PC，PS和SMMA-20%的数据点和拟合曲线峰开口向上，表明材料在测试条件下存在非饱和吸收的非线性吸收行为。脂肪链的COP的数据点和拟合曲线峰开口向下，表明材料在测试条件下存在饱和吸收的非线性吸收行为。Z扫描测试表明PMMA在5种光学树脂中非线性吸收活性最弱，说明PMMA优秀的光存储性能并不是源于较强的非线性吸收活性。因此，非线性吸收活性也不是影响材料光存储性能的主要因素。

2.4 聚合物基存储介质的辐照损伤

飞秒微爆光存储中，信息记录机理是材料吸收激光能量，积累自由电子产生等离子体，等离子体爆炸产生空穴[11]。因此信息记录又可以视作使用高能高压自由电子对材料进行消材加工。而扫描电子显微镜是采用聚焦电子束扫描材料来生成图像，成像的原理是电子和样品的原子相互作用，与飞秒微爆光存储信息记录机理具有相似性。改变加速电压和放大倍率，能够观察材料受到不同能量的电子束作用时微观形貌发生的变化，对材料进行辐照损伤研

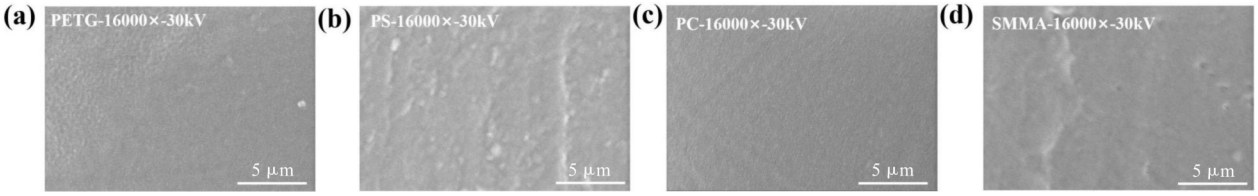


Fig. 9 SEM images of (a) PETG, (b) PS, (c) PC and (d) SMMA-10% after high energy electron beam

究。因此,本文采用扫描电子显微镜对各类光学树脂进行了辐照损伤研究,对比各类光学树脂对高能电子作用的敏感度。如Fig.8~Fig.10所示,光学树脂在经过不同能量的电子束后作用后,统一以相同的放大倍数和加速电压进行成像,观察微观形貌变化。只有PMMA在扫描显微镜的高能电子束作用下会发生质量损失,产生裂纹。并且当通过增加放大倍率和加速电压增加电子能量时,材料裂纹扩展,表明材料在辐照下的质量损失增加。而其他光学树脂在相同高能电子束作用下,微观形貌依旧,没有发生质量损失。值得指出的是,向PMMA主链中引入苯乙烯链段得到的SMMA-10%在辐照下并不会产生质量损失。这说明苯环稳定的环状结构能够增强材料在高能电子辐照下的稳定性,防止链的断裂,阻碍质量损失的产生[15]。基于实验发现,本文提出,高分子链结构中的酯键结构和苯环结构能够影响材料在高能电子作用下的稳定性,进而影响光存储性能。高分子链结构中含有酯键的光学树脂在信息记录过程中受到高能电子作用更容易发生链的断裂产生质量损失,因此在信息记录过程中,产生空穴所需要的沉积能量更小,能量释放产生的致密区和热作用区域相对较小,因此信息记录能够在更高的密度下进行,光存储性能越好,典型材料如PMMA。而高分子链结构中含有苯环的光学树脂在信息记录过程中受到高能电子作用不容易发生质量损失,材料需要沉积更大的能量后才会发生质量损失产生空穴。沉积的能量不仅用于消蚀材料产生空洞作为信息符,也会产生更强的冲击波压缩周边材料,同时会产生更强的热效应扭曲周边材料,因此在高密度信息记录时误码率更高,光存储性能更差,典型材料如SMMA-30和PS。高分子的主链结构决定材料对高能电子作用的敏感性,从而影响材料的光存储性能。

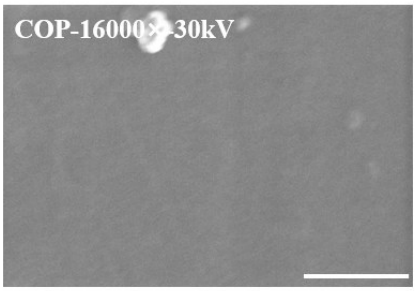


Fig. 10 SEM image of COP after high energy electron beam

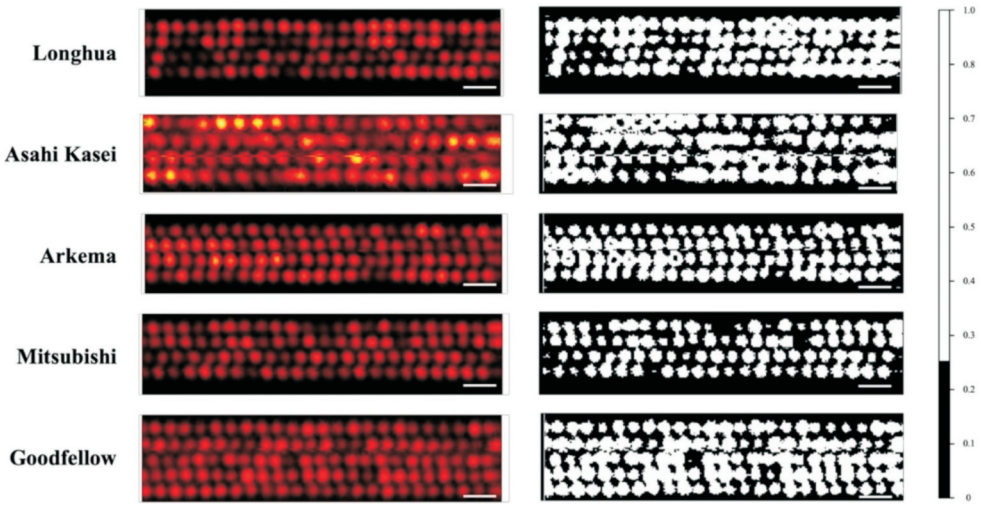


Fig. 11 Confocal microscope images and the grey scale processing results of different PMMA (scale bar=1 μm)

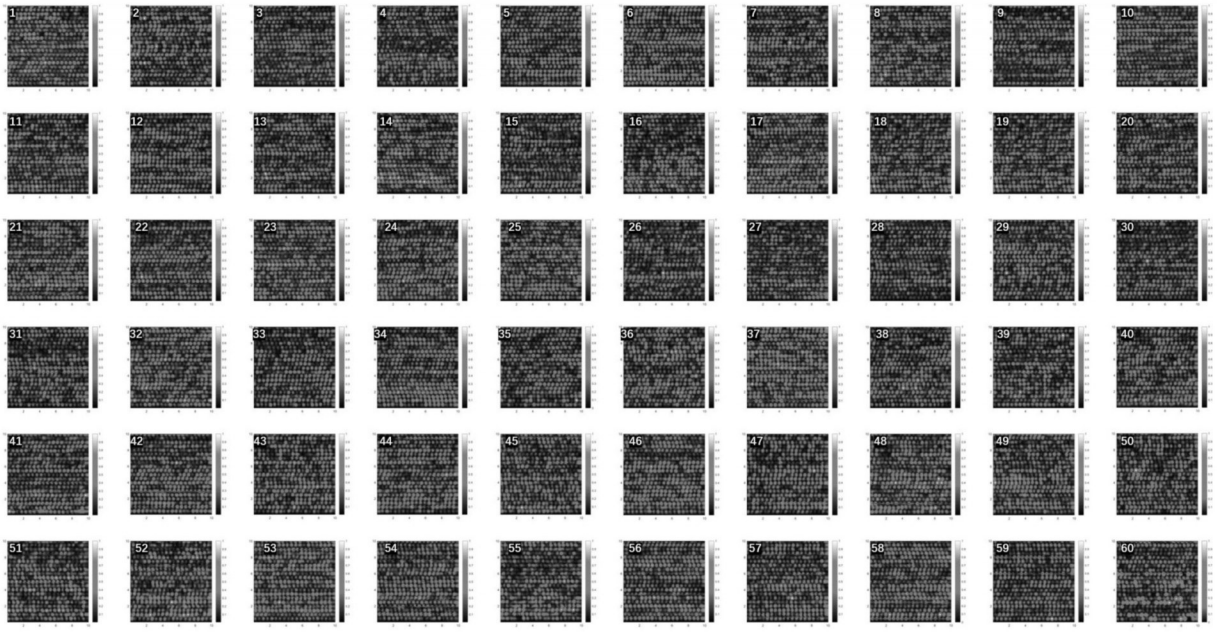


Fig. 12 60-layer data recording with 500 nm×500 nm bit separation and 2.5 μm vertical separation in PMMA

Tab. 2 Molecular weights and distribution of different PMMA

PMMA	M_n	M_w	PDI
Asahi Kasei	59200	90600	1.53
Arkema	59200	90600	1.83
Mitsubishi	62900	119100	1.53
Goodfellow	813900	1196000	1.47
Longhua	55200	86400	1.56

2.5 PMMA材料的高密度光存储

基于研究发现，本文认为在测试对比的光学树脂中，高分子链中具有酯键且不存在苯环的PMMA材料对高能电子作用有敏感性，最适合作为飞秒微爆光存储的存储介质。如Fig.11所示，本文测试对比了具有不同相对分子质量及其分布的PMMA的光存储性能，相对分子质量及其分布如Tab.2所示。结果表明，当相对分子质量在5×10^4~8×10^5这个范围内变化时，PMMA的光存储性能差异不大，在各个PMMA上记录的点阵中信息符信号都较为均匀，误码率均较低。这表明相对分子质量也不是影响光存储性能的主要因素。

如Fig.12所示，本文在PMMA-Longhua材料上进行了60层信息读写测试，信息符横向间距500 nm×500 nm，纵向间距2.5 μm，证实了在PMMA材料上能够进行高密度多层光存储，材料的存储密度达到1600 GBits/cm^3。在光盘物理规格不变的情况下，有望将光盘的单盘容量从蓝光光盘的25 GB提高至1336 GB。

3 结论

本文选择误码率作为关键性能指标，测试对比了不同光学树脂的高密度飞秒微爆光存储信息记录读取下的光存储性能。采用相关系数量化了材料链结构、力学性质、介电性质、热性质和光学性能和光存储性能之间的依赖关系，从而揭示了光学树脂的链结构才是影响材料光存储性能的决定性因素：高分子链中酯键含量和误码率存在负依赖关系，苯环

含量和误码率存在正依赖关系。光学树脂的辐射损伤研究对比初步说明了链结构不同的光学树脂对高能电子作用的敏感性不同,从而影响了光存储性能。研究揭示了材料链结构和光存储性能之间的构效关系,为飞秒微爆光存储技术介质材料的选择提供了理论指导依据。基于研究发现,在PMMA上进行了高密度多层光存储信息读写测试,材料存储密度高达1600 GBits/cm^3。

参考文献:

[1] Sabharwal R, Miah S J. A new theoretical understanding of big data analytics capabilities in organizations: a thematic analysis[J]. Journal of Big Data, 2021, 8: 159.

[2] Liu Y, Wei X, Xiao J, *et al*. Energy consumption and emission mitigation prediction based on data center traffic and PUE for global data centers[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3: 272-282.

[3] Jiang X, Wang Q. A low-power, long-life and energy-saving method for cold data storage[C]//Proceedings of the 2016 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer. Tianjin: Atlantis Press, 2016.

[4] 陈韦良, 张静宇. 大容量光存储的维度扩展[J]. 光电工程, 2019, 46(3): 70-81.

Chen W L, Zhang J Y. Dimensional extension of high-capacity optical storage[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(3): 70-81.

[5] Jain A, Rahimian M G, Bhardwaj V R. Optimization of multi-layer data recording and reading in an optical disc[J]. Photonics, 2022, 9: 690.

[6] Wei X, Zhao W, Yang J, *et al.* Direct writing-in and visualizing reading-out data storage with high capacity in low-cost plastics [J]. Journal of Semiconductors, 2022, 43: 062301.

[7] Reinsel D, Gantz J, Rydning J. The digitization of the world from edge to core[EB/OL]. Framingham: IDC, 2018. https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf.

[8] Cheng W, Wang Z, Liu X, *et al.* Microexplosions in bulk sapphire driven by simultaneously spatially and temporally focused femtosecond laser beams[J]. Optics Letters, 2023, 48: 751.

[9] Wang X, Liu R, He Y, *et al.* Determination of detonation characteristics by laser-induced plasma spectra and micro-explosion dynamics[J]. Optics Express, 2022, 30: 4718.

[10] Gao L, Zhang Q, Evans R A, *et al.* 4D Ultra-high-density long data storage supported by a solid-state optically active polymeric material with high thermal stability[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9: 2100487.

[11] Tan D, Sharafudeen K N, Yue Y, *et al.* Femtosecond laser induced phenomena in transparent solid materials: fundamentals and applications[J]. Progress in Materials Science, 2016, 76: 154-228.

[12] 刘姿廷,袁一鸣,李子越, 等. 飞秒激光与透明硬质材料的相互作用:从相变机理到永久光存储[J]. 中国激光, 2023, 50(18): 1813005.

Liu Z T, Yuan Y M, Li Z Y, *et al*. Femtosecond laser interaction with transparent hard materials: from phase transition mechanisms to permanent optical storage[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(18): 1813005.

[13] 王磊, 张栩, 王熠, 等. 飞秒激光永久光存储的发展及挑战[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002504.

Wang L, Zhang X, Wang Y, *et al*. Developments and challenges in permanent optical storage with femtosecond lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002504.

[14] Kennedy-Shaffer L. Before $p < 0.05$ to Beyond $p < 0.05$: using history to contextualize p-values and significance testing[J]. The American Statistician, 2019, 73(sup1): 82-90.

[15] Egerton R F, Li P, Malac M. Radiation damage in the TEM and SEM[J]. Micron, 2004, 35: 399-409.

Polymer-Based Storage Media for High-Density Multilayer Optical Storage Applications

Yuhao Duan, Fengying Yang, Yitong Ding, Ying Xiong, Shaoyun Guo
(*State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Polymer Research Institute of Sichuan University, Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Plastic/Rubber Complex Processing Technology, Chengdu 610065, China*)

ABSTRACT: Femtosecond microburst multi- layer optical storage, which records data across multiple layers within a medium, promises to significantly expand the capacity limits of optical discs, potentially overcoming the issue of insufficient traditional optical disc storage. However, the process of data recording is affected by various factors, leading to a lack of theoretical basis for medium material selection. This study identified the bit error rate as key indicator of optical storage performance and compared the optical storage capabilities of different optical resins. The relationship between material mechanical properties, thermal properties, optical properties, dielectric constants, and the main chain structure with optical storage performance was quantified, revealing that the main chain structure of optical resins is the decisive factor affecting optical storage performance. Based on these findings, high- density multi- layer optical storages were conducted on polymethyl methacrylate materials, achieving a storage density of 1600 Gbit/cm^3 with up to 60 layers. This research underscored the significance of main chain structure in enhancing optical storage performance, providing a perspective for material selection in femtosecond microburst multi-layer optical storage.

Keywords: optical data storage; storage medium; femtosecond laser; multi-photon absorption