

文章编号: 0258-7025(2004)09-1036-05

# 短脉宽 XeCl 激光器的实现及 光脉冲参数的测量

任 韧<sup>1,2</sup>, 陈长乐<sup>2</sup>, 徐 进<sup>3</sup>, 袁 孝<sup>2</sup>, 金克新<sup>2</sup>, 王永仓<sup>2</sup>, 宋宙模<sup>2</sup>, 魏炳波<sup>2</sup>

(西安交通大学<sup>1</sup>理学院,<sup>3</sup>生物医学工程所, 陕西 西安 710049;<sup>2</sup>西北工业大学应用物理系, 陕西 西安 710072)

**摘要** 研究了高压短脉宽 XeCl 准分子激光器的设计、制作和激光参数测试。在大体积高压下, 采用同步紫外预电离产生辉光放电方法, 结合激光器物理设计、电路、光学系统设计, 调整气体配比、气压、放电电压, 在气体配比为 HCl: Xe: He=0.1%: 1%: 98.9% 下, 实现了纳秒放电激励的紫外 308 nm 准分子激光激励, 脉冲能量 530 mJ, 最小脉冲宽度 13 ns, 矩形光斑 2 cm×1 cm, 束散角 3 mrad, 最高重复频率 5 Hz, 并总结了实验规律。

**关键词** 激光技术; 准分子激光; 纳秒放电; 预电离; 辉光放电

**中图分类号** TN 248.2+2 **文献标识码** A

## Study on Short Pulse Width XeCl Laser

REN Ren<sup>1,2</sup>, CHEN Chang-le<sup>2</sup>, XU Jin<sup>3</sup>, YUAN Xiao<sup>2</sup>,  
JIN Ke-xin<sup>2</sup>, WANG Yong-cang<sup>2</sup>, SONG Zhou-mo<sup>2</sup>, WEI Bing-bo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Science, <sup>3</sup>Institute of Biomedical Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

<sup>2</sup>Applied Physics Department, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

**Abstract** A high pressure, short pulse duration XeCl laser was fabricated, and laser parameters were measured. Aiming at large volume and high gas pressure, the laser system adopted the ultraviolet preionization to produce glow discharge. The result was that the nano-second (ns) discharge pumped 308 nm excimer laser was realized in proportion of HCl: Xe: He=0.1%: 1%: 98.9% with the output pulse energy of 530 mJ and the minimal pulse duration of 13 ns. The rectangle facula is 2 cm×1 cm, the beam divergence is 3 mrad, and the maximal repetition frequency is 5 Hz.

**Key words** laser technique; excimer laser; nanosecond discharge; preionization; glow discharge

## 1 引 言

近二十年来短脉冲激光发展迅速, Di Lazzaro 采用被动锁模技术实现了纳秒脉冲激光, Sztamari 用准分子抽运染料激光实现飞秒激光<sup>[1]</sup>。短脉冲激光器已发展成为一种高能激光器件。短脉冲激光器中准分子激光波长短, 能量密度大, 紫外辐射效率高, 实现的脉冲宽度在 10~50 ns 之间, 对材料有良好的消融剥蚀效应, 被应用在半导体、超导、微电子、

光化学、激光外延生长、生物医学等领域。随着微电子、半导体、纳米微小尺度研究的深入, 短脉冲准分子激光的研究日益受到人们的重视<sup>[2~5]</sup>。

虽然准分子激光器研究较早, 但对大体积 34195 cm<sup>3</sup>, 高压 > 253.3125 kPa 的短脉冲准分子激光的研究报道较少。本研究在高压、大体积的辉光放电抽运条件下, 实现了高压大体积的短脉冲宽度的准分子激光器。关键技术和特点包括: 1) 为避免弧光放电, 使触发脉冲宽度小于亚稳态能

收稿日期: 2003-07-31; 收到修改稿日期: 2003-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60171043)和陕西省自然科学基金(No. 2001C21)资助项目。

作者简介: 任 韧(1966—), 男, 西安交通大学博士研究生, 主要从事大功率激光技术、半导体激光、激光分子束外延、脉冲激光沉积和光电子技术研究。E-mail: renr01@sohu.com

级寿命,实现均匀电离和粒子数反转;2) 工作中采用高压 6~40 kV 直流脉冲放电抽运, RC 逐级触发和并行多路宽连接,放电电感 $<10^{-10}$  H;3) 采用自动同步紫外预电离电路,获得纳秒脉冲放电前沿,实现了高气压、大体积( $34195\text{ cm}^3$ )和高电压的均匀辉光放电;4) 通过气体组份的调整,实现了 XeCl 准分子激光 308 nm 激射,窄脉冲宽度下限 13 ns,工作脉宽 18.65 ns,单脉冲工作能量 400 mJ,矩形光斑大小  $2\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ ,束散角 3 mrad,最高重复频率 5 Hz。

随气压、脉冲放电电压的变化,获得了不同激光脉冲能量和宽度。获得的窄脉冲 XeCl 准分子激光,对非金属氧化物金刚石、超导巨磁靶材形成了良好等离子剥蚀溅射羽辉和基底的沉积。可应用于光电材料光刻,金刚石薄膜沉积、晶体表面微小尺度材料的薄膜制备、激光掺杂、纳米及介观异质结构和缺陷晶格效应实现等<sup>[1,6~10]</sup>。

XeCl 准分子激光器属于准分子的束缚-自由跃迁,寿命很短,上能级寿命  $10^{-8}$  s,下能级寿命  $10^{-13}$  s,是激发态到排斥的基态之间的跃迁,基态准分子不存在,通道顺畅,量子效率高。激光脉宽纳秒量级,抽运功率在  $1\text{ MW/cm}^3$  以上,工作气压在 50650~303900 Pa。

## 2 实验装置及实现

### 2.1 XeCl 激光器装置

本装置采用内径  $\phi 220\text{ mm}$ ,外径  $\phi 270\text{ mm}$ ,长为 105 mm 的环氧玻璃钢筒为放电谐振腔。两端装配法兰盖板密封,一端不锈钢盖板装配  $\phi 50\text{ mm}$  的透明平面石英镜作为出射窗口。另一端为镀铝的 K9 玻璃平面反射镜。系统分电路、气路、系统结构、光学组件四部分。

结构装置如图 1 所示,实验过程为气体管路系统按比例配气,采用自动放电的紫外预电离电路实现高压放电下的大体积整体辉光放电。Max 发生器采用低电感的陶瓷电容阵列实现纳秒脉冲放电。预电离连接的峰化电容与预电离阵在主电极两侧对称均匀分布。高压紫外预电离产生初始电子,降低击穿电压,同步产生辉光放电。主电极为紧凑双曲线对称面型,快恢复火花开关采用控制腔内气体流动压强,闸流管纳秒触发火花塞,气体击穿,实现了低抖动、高功率、大电流关断。闸流管驱动火花开关实现前沿陡峭、脉宽窄的电流放电脉冲。全回路并

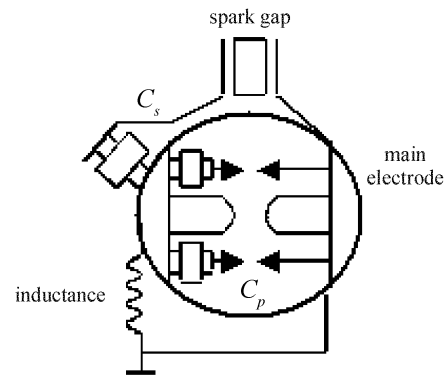


图 1 XeCl 激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of the XeCl laser structure

行,宽紫铜紧凑连接,回路的电感、阻抗小。

实验装置中,储能电容  $C_s = 70.4\text{ nF}$ ,储能电容向峰化电容转换时间为 150 ns。XeCl 介质气体的抽运强度  $W$  为  $1.3959\text{ MW/cm}^3$ ,达到了抽运强度在  $1\text{ MW/cm}^3$  以上的设计要求,输出最大的抽运平均功率为 422.4 MW,能量转换效率为 4.35%。抽运激励电流缓慢下降的下降沿与陡峭的放电电压上升前沿耦合,产生大的抽运功率。

### 2.2 XeCl 准分子激光的实现

XeCl 激发态  $\text{XeCl}^*$  通过气体反应动力学方程和脉冲放电物理设计实现。

准分子形成的气体反应动力学过程:首先是紫外预电离产生初始电子,其次电子与氙原子彭宁电离形成激发态  $\text{Xe}^*$  原子,HCl 激发振动电离,最后  $\text{He}/\text{HCl}/\text{Xe}^*$  三体复合形成  $\text{XeCl}^*$  准分子,激发态的准分子辐射跃迁产生激光。

产生激光的主要步骤为:1) 纳秒放电电路,如图 2 所示。为了获得窄脉宽,放电回路必须采用脉冲压缩技术,如多级变压器,级联 LC 电路充放电,5C 闸流管启动大功率、低电感火花隙开关,触发纳秒级放电脉冲。2) 短波长对输出耦合镜提出更高要求,实验用 JGS-1 石英镜。反射膜采用铝膜或银膜,用  $\text{MgF}_2$  与  $\text{SiO}_2$  及多层介质多晶硅膜作为保护

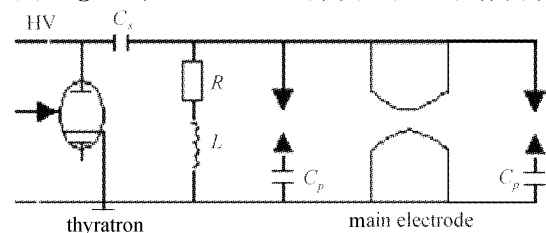


图 2 放电回路电路示意图

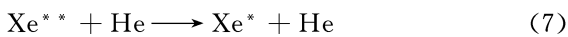
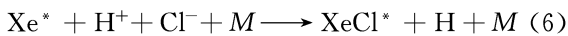
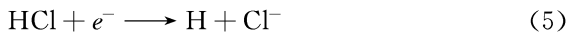
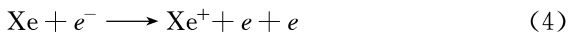
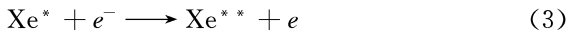
Fig. 2 Schematic of discharge circuit

膜,能承受高能量。3) 激光谐振腔采用平行平面腔。XeCl 激光输出必须满足临界腔电磁场的模式要求。与采用非稳腔和稳定腔相比,其几何损耗介于两者之间。激光器的腔长  $L$ ,光频率  $\nu$  满足

$$\nu = n \frac{c}{2L \cos \varphi} \quad (n \text{ 为正整数}) \quad (1)$$

XeCl 激光输出是一种多模式的,准分子激光谐振腔模体积越大,输出单位体积的 XeCl\* 反转粒子越多,准分子激光输出越大。4) 在脉冲放大模式下,由于从激发态到排斥基态间能级差较大,阈值功率也越大,需要较大的脉冲抽运能量,系统的抽运强度为  $W = 1.3959 \text{ MW/cm}^3$ 。

通过气体反应动力学方程对 XeCl\* 密度及小信号下激光增益系数、饱和强度等参数分析,实验获得了气体配比规律和良好激光输出参数。XeCl 准分子气体反应过程为<sup>[11]</sup>:紫外预电离产生大量的低速电子与 Xe 形成激发态 Xe\* 原子,其中 Xe\*\* 和 Xe+ 分别为二次激发的 Xe 原子和 Xe 离子, e- 为快速电子



式中,  $M$  为缓冲气体 He/Ar/Ne,动力学反应设计中考虑了 XeCl\* 准分子的增益系数、饱和强度、感应辐射截面积<sup>[4]</sup>。光强大小由增益系数和饱和程度决定,其中增益系数为  $G = \frac{1}{dL} \cdot \frac{dI}{I}$  决定,  $I$  为光强度。

饱和强度  $I_s$

$$I_s = h\nu / \sigma = 1.1827 \text{ MW/cm}^2$$

式中  $\sigma$  为平均感应辐射截面,  $\tau$  为激发态能级寿命。XeCl\* 分子的  $\sigma = 4.55 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ ,  $\tau = 12 \text{ ns}$ 。

### 3 光脉冲参数测试实验

激光参数测试装置如图 3 所示,以 XeCl 准分子激光器为测试对象,用光栅单色仪测试波长,部分激光束经多次反射衰减入射测试脉宽。实验装置中包括石英光学组件、光学衰减片、紫外光电二极管探测器、激光能量计和 JMAX43 激光能量锥探斗。仪器有 WD500-1 光栅单色仪,自动光栅扫描控制仪。

光波长测试中,所有光学系统调整在一个平面内,光电探测器、光电锥探斗等测试仪器电磁屏蔽。激光从 WD500-1 单色仪的宽度为 0.05 mm,缝高度

为 25 mm 的狭缝进入,波长连续扫描由自动光栅单色扫描控制仪控制,采用手动、自动 250°/s 和 50°/s 控制,测得波长为 308 nm。激光光谱测试由 WD500-1 光栅单色仪和 Boxcar 信号平均器进行。

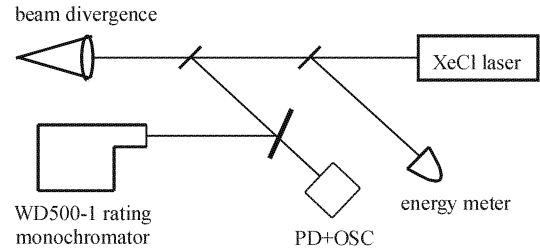


图 3 XeCl 准分子激光器激光参数的测试光路  
Fig. 3 Measurement diagram of laser parameters

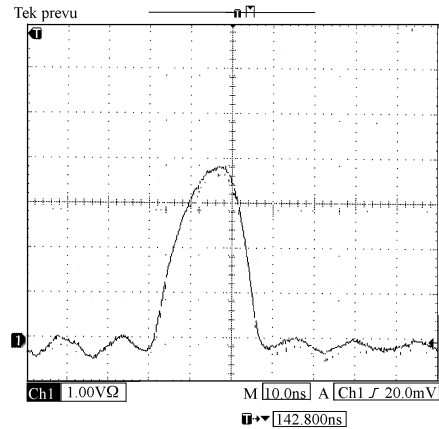


图 4 32.5 kV,303.975 kPa 下测得的激光脉宽为 18.65 ns

Fig. 4 Measured pulse width curve under 303.975 kPa, 32.5 kV DC

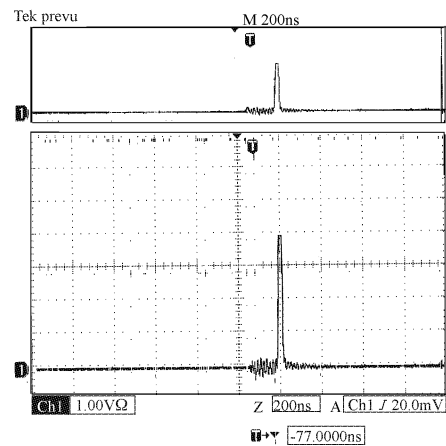


图 5 30 kV,253.3125 kPa 下测得的激光脉宽为 21.89 ns

Fig. 5 Measured pulse width curve under 253.3125 kPa, 30 kV DC

激光脉宽测试方法为, 激光经衰减、反射后由 Molelectron 的 UV 紫外探测器接收, 光电转换信号进入 TEKTRONIX200 MHz 示波器, 光脉冲被实时监测。测得的脉冲宽度为 18.65 ns, 如图 4, 5 所示, 最小测试脉宽为 13 ns。

测试时光脉冲要求探测器对紫外光具备纳秒快响应, 测试过程需屏蔽电磁干扰, 输出由 TEKTRONIX200M 示波器和光电探测器记录激光脉冲波形。

## 4 结果与分析

实验结果如图 6 所示, 在 32 kV 下介质气体压强增大, 脉冲宽度变窄。提高放电电压和混合气体压强, 抽运功率和能量增大, 否则输出激光能量下降, 脉宽展宽。激光脉冲的宽度由准分子能级弛豫时间决定, 分子能级弛豫时间长, 脉冲宽度展宽。压强提高使单位体积混合粒子数密度及 XeCl\* 准分子密度升高, 减小了粒子平均自由程, 弛豫时间下降, 输出窄脉宽, 气体增益增加, 光脉冲齿状振荡减小, 曲线平滑。

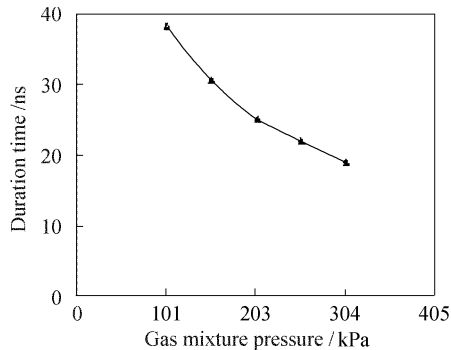


图 6 脉宽随气压的变化规律

Fig. 6 Relation between the pressure of gas and pulse duration of laser pulse

图 7 为混合气体放电电压 38 kV 下, 308 nm 准分子激光在不同 HCl: Xe: He 组份时的激光能量。气体配比为 HCl: Xe: He = 0.05% : 1.2% : 98.75% 时, 单脉冲的能量最高, 达到 530 mJ。体积配比中, 曲线 1, 2, 3 卤化物相对较高, 输出能量增大, 但辉光放电的稳定性差。在配比为 HCl: Xe: He = 0.08% : 0.9% : 99.02% 和 0.1% : 1% : 98.9% 时, 能量变化曲线有下降沿, 气压 405.3 kPa 时, 气压的升高不再伴随输出能量的提高。

电压与脉宽的关系为加大电压时, 辉光放电主

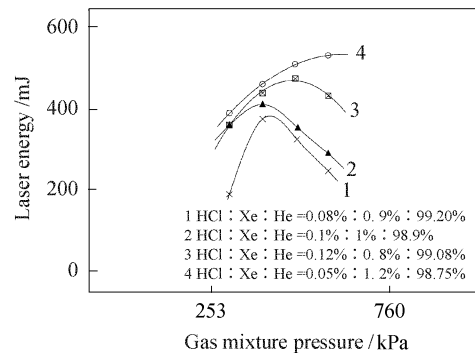


图 7 38 kV 下激光脉冲能量与气室压强的关系曲线

Fig. 7 Measured laser energy of pulse and gas mixture pressure curve under 38 kV DC

电极间电压增大, 将产生对模体积较大的抽运功率, 使单位体积反转的准分子数剧增, 快速形成高能脉冲, 在时间上形成光脉冲波形压缩, 脉宽变窄。

动力学方程及激光数值模拟显示, 一方面决定 XeCl 激光脉宽的因素是从小信号增益、饱和增益到过饱和增益状态的过程, 增益系数对 XeCl 激光脉宽有作用, 在小信号增益、饱和增益下, 放电电压和气压升高, 单脉冲能量提高, 脉宽减小, 而过饱和状态下, 随电压的升高, 气体压强增加, 能量下降, 增益曲线下降。另一方面, 混合气体中 H<sub>2</sub> 的存在降低了气体温度和电子温度, 阻止了自发辐射, 促使下一次脉冲预电离更彻底, 辉光放电更均匀。

## 5 结 论

从 XeCl 激光的实现和激光参数的测试表明: 同步紫外预电离可以实现高压、大体积辉光放电和准分子激光, 获得的最大单脉冲能量为 530 mJ, 脉冲宽度最小为 13 ns。决定脉冲参数的因素是气体压强、放电电压和 Xe: HCl: He 组份比。通过增大介质气体压强, 提高放电电压, 脉冲宽度变窄。

## 参 考 文 献

- 1 T. Efthimiopoulos, D. Zigos. Two-photon dissociation of HgBr<sub>2</sub> as passive mode locking mechanism of a long-pulse XeCl excimer laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(4-5): 515~519
- 2 Han Li, Zhang Lianshui, Zhao Xiaohui *et al.*. Formation of XeI\* excimer in the discharge plasma [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4): 332~334  
韩 理, 张连水, 赵晓辉 等. 放电等离子体中 XeI\* 准分子的形成过程[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4): 332~334
- 3 Zhao Yongpeng, Wang Qi, Liu Jincheng. Kinetics on Ar<sub>2</sub><sup>+</sup> ionic excimer pumped by electron beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 391~394

- 赵永蓬,王 骐,刘金成. 电子束抽运 Ar<sup>+</sup> 离子准分子的动力学过程[J]. 中国激光, 2003, **30**(5):391~394
- 4 Guo Guangsheng, Zeng Hulie, Han Dongmei *et al.*. Primary study on polymerization of acrylic acid arisen by excimer laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):307~310  
郭广生,曾湖烈,韩冬梅等. 准分子紫外激光引发丙烯酸聚合反应的初步研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(4):307~310
- 5 Zhang Ninglin, Song Zhitang, Xing Su *et al.*. Investigations on the relations between crystal structure and electrical properties of ZrO<sub>2</sub> thin films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):345~348  
章宁琳,宋志棠,邢 溯等. 准分子脉冲激光沉积法制备的 ZrO<sub>2</sub> 薄膜结构和电学性能的研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(4):345~348
- 6 M. Martino, A. Luches, M. Fernandez *et al.*. Characterization of thin indium tin oxide films deposited by pulsed XeCl laser ablation [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**(17):2606~2609
- 7 V. S. Skakun, M. I. Lomaev, V. F. Tarasenko *et al.*. KrCl and XeCl excimer glow discharge lamps with an output power of ~1.5 kW [J]. *Technol. Phys. Lett.*, 2002, **28**(11):899~901
- 8 S. Ito. Continuous operation up to 3 kHz in a discharge-pumped XeCl excimer laser [J]. *Appl. Phys. B*, 1996, **63**(1):1~7
- 9 T. Saito, S. Ito. Long lifetime operation of an ArF-excimer laser [J]. *Appl. Phys. B*, 1996, **63**(2):229~235
- 10 L. Feenstra, H. M. J. Bastiaens, P. J. M. Peters *et al.*. On the long pulse operation of an X-ray preionized gas discharge pumped ArF excimer laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**:23~24
- 11 T. Letardi, H. Fang, S. Fu. Theoretical modeling of an X-ray preionized self-sustained XeCl laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(7):1647~1652

## 欢迎订阅 2005 年《人工晶体学报》

《人工晶体学报》是由中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会和中非人工晶体研究院联合主办,由《人工晶体学报》编辑委员会编辑,人工晶体学报社出版的国家级学术性期刊,是我国唯一专门刊登人工晶体材料这一高新技术研究领域成果的学术性刊物。它以论文和简报等形式报道我国在晶体材料:半导体材料、光电子材料、压电晶体材料、纳米材料、薄膜材料、超硬材料和高技术陶瓷等在理论研究、生长技术、性能、品质鉴定、原料制备,以及应用技术和加工等方面的最新科研成果,同时介绍国内外晶体材料的发展动态与学术交流会议及会议信息。刊户覆盖以上各行业的大专院校、科研院所、生产经营单位和省(市)图书馆、政府相关部门,本刊已在美、日、英、俄、德等国家和地区发行。

《人工晶体学报》为中文核心期刊,美国工程索引(ED)收录源期刊。全文在“万方数据数字化期刊群”及“中国期刊全文数据库”上网。2004年6月被《中国知识资源总库·科技精品期刊库》收入。

刊 号:ISSN 1000-985X CN 11-2637/O7 广告经营许可证:京朝工商广字 0016 号

主办单位:中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会 中非人工晶体研究院

刊 期:双月刊

开 本:大十六开

2005年《人工晶体》学报全年定价 240 元,可直接与编辑部联系订阅。

银行汇款方式:

邮局汇款方式:

收款单位:中非人工晶体研究院

邮 编:100018

开户银行:北京工商行管庄分理处

北京 733 信箱《人工晶体学报》编辑部

帐 号:144330-01

网 址:www.jtqb.cn

电 话:(010)65492968

E-mail:bjb@jtqb.cn

传 真:(010)65493320