

脉冲氙灯电源研究^{*}

邵若燕, 刘建军, 吴睿骅, 梁海荣, 李海兵

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 高速摄影的同步照明光源是利用脉冲氙灯作为输出负载的一种高亮度闪光光源。它的驱动电路采用脉冲形成网络 PFN 电路, 利用 Orcad Pspice 软件对 PFN 放电电流仿真, 其仿真结果具有一定的指导意义。电源具有手动触发和同步触发功能, 同时输出脉冲的前沿和后沿具有良好的时间响应, 氙灯充电电压 0~3.5 kV 可调, 触发信号与光波形延时时间 125 μ s; 实验结果验证了电源设计原理和技术方案的可行性。

关键词: 高速摄影; 脉冲氙灯; PFN 电路

中图分类号: TN245 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201931.180331

Pulsed xenon lamp power supply

Shao Ruoyan, Liu Jianjun, Wu Ruihua, Liang Hairong, Li Haibing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The synchronous lighting source of high-speed photography is a kind of high brightness flash light source which uses the pulsed xenon lamp as the output load. Its driving circuit adopts pulse forming network PFN circuit, using Orcad Pspice software to simulate the discharge current of PFN, its simulation result has certain guiding significance. The power supply has the function of manual trigger and synchronous trigger, the front and back edges of the output pulse have good time response. The charge voltage of xenon lamp is 0~3.5 kV, and the delay time of trigger signal and optical waveform is 125 μ s with light wave shape. The design principle and technical scheme of the power supply are proved by the experiment.

Key words: high-speed photography; pulsed xenon lamp; PFN circuit

PACS: 29.25.Bx; 84.30.Jc

高速摄影是爆轰、射流、材料方程等物理研究领域的一种常用诊断手段^[1]。高速摄影技术的飞跃发展又促进了照明光源技术的发展^[2], 高速摄影通常采用具有高亮度的脉冲氙灯作为光源, 其基本原理是利用储能电容对氙灯放电, 性能良好的脉冲氙灯放电装置可以激励氙灯获得高而稳定的照度, 同时还可以对氙灯放电过程进行精确的延时控制。目前, 国内外脉冲氙灯电源主要采用电容储能高压触发技术, 依据实际理论实现 PFN 电路, 而氙灯本身的放电特殊性, 理想状态下的电路存在放电脉宽及电流上升沿缺点, 满足不了实际工作条件。本文依据脉冲氙灯的放电特性, 采用 Orcad Pspice 软件^[3]对 PFN 电路进行分析与验证, 从而确定放电回路的参数, 分析控制电路和触发电路的工作原理。试验结果证明脉冲氙灯电源满足了高速摄影系统的测试指标, 电源运行可靠。

1 基本组成

本文阐述的高速摄影闪光照明系统是由高压脉冲触发电路和氙灯充、放电回路两部分构成, 其中高压触发电路主要采用模拟电路、驱动电路以及可控硅等电路相结合的技术方法。氙灯充、放电回路主要采用高压电源、PFN(脉冲形成网络)线路, 从而实现了电源系统中氙灯充放电的功能, 主要由充电电源、储能和放电回路三部分组成^[4]。

1.1 工作原理

当脉冲氙灯电源接收到外触发脉冲信号时, 触发控制电路就会产生高压高频脉冲信号, 对脉冲氙灯进行点火。脉冲氙灯一旦被击穿后, 经充电的 PFN 网络电路向其放电。

^{*} 收稿日期: 2018-11-19; 修订日期: 2019-01-14
作者简介: 邵若燕(1978—), 女, 工程师, 从事激光泵浦源检测与研究; sryy0638@sina.com。

1.2 脉冲氙灯的电特性参数

脉冲氙灯的发光是一个非稳态气体放电过程,在整个放电过程中,脉冲氙灯两端的电压、电流以及电阻都有着非常大的变化,因此,脉冲氙灯在整个放电过程中并不能认为是恒定电阻值的导体^[5]。在电弧增长的过程中,灯阻为时间的递减函数,当电弧稳定后,氙灯电压与电流的关系 $V = K_0 i^{0.5}$,其中 K_0 为灯的阻抗特性,其值取决于灯的尺寸及填充气体的气压,可以根据公式求得^[6]

$$K_0 = 1.28 \frac{l}{d} \left(\frac{P}{450} \right)^{0.2} \quad (1)$$

式中: P 为氙灯的气压; l 为氙灯两电极之间的距离; d 为氙灯的内径。在大电流放电条件下,氙灯管内充满了等离子体,此时氙灯的电阻为

$$R_L(i) = K_0 i^{-0.5} \quad (2)$$

2 电路设计

2.1 PFN 脉冲形成电路及仿真

PFN 脉冲形成电路是脉冲氙灯的放电主回路,主要由储能电容器、脉冲平滑电感及负载氙灯组成^[7]。常用多节脉冲形成网络放电线路产生的方波放电脉冲来延长放电时间,同时增加氙灯输入能量而不易引起灯的损坏。现有的理想 PFN 电路,是根据 C, L 及负载三者关系确保放电处于临界阻尼状态,得到的放电电流波形脉宽宽,放电能量能全部被器件吸收。而此电源由于氙灯负载强度要求高,脉宽窄及上升沿时间短等要求的特殊性,常规 PFN 电路不能达到放电参数要求,转换思维方式采取非理论匹配电路,同时利用加速电容来实现放电要求。电路如图 1 所示,其中并联在负载两端的电容 C_4 是加速电容,其目的是在放电过程中能快速打通氙灯放电沟道,减小氙灯初始电阻,提高第一个峰值电流,使放电起始瞬间能与高速摄影信号能同步。

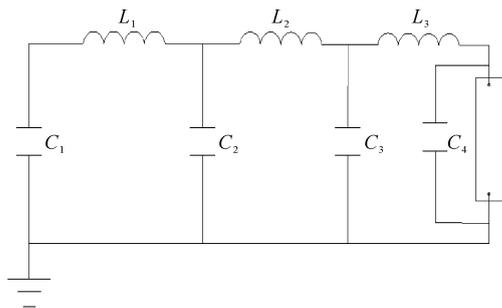


Fig. 1 PFN circuit with accelerating capacitor
图 1 带加速电容的 PFN 电路

PFN 电路节数的选取是根据氙灯放电时间和方波的质量决定的。一般要求方波脉冲的前后沿越陡,节数的数量就要取得越大。通过前期的初步计算,最终选用三节回路。为了得到理想的方波,先确定放电电容及电感的参数,计算氙灯放电时间。从脉冲氙灯放电机理出发,根据脉冲氙灯伏安特性,采用 Pspice 模型元件构造脉冲氙灯模型^[8],利用 Pspice 仿真软件对前期放电参数进行验证,PFN 仿真电路图如图 1 所示。

图 2 是 PFN 理想匹配电路放电条件下的仿真电流波形。从图中可以看出,峰值电流 3.5 kA,放电底宽 210 μs 。采取非理论匹配电路,减少第一个 LC 电路的电感量 L_4 ,从而提高第一个电流峰值。通过试验方法调整电感量,来获得理想的电流输出波形且波形接近平顶的方波,这种方法应用在高速摄影中效果明显。为了满足实际工作要求,重新调整回路的放电参数,电路原理图如图 3 所示。

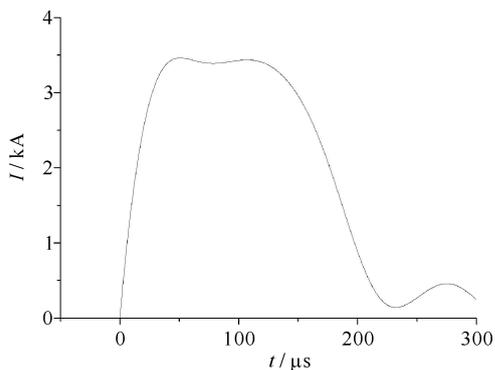


Fig. 2 Discharge current wavefom of PFN simulation circuit

图 2 理想匹配 PFN 仿真电路放电电流波形

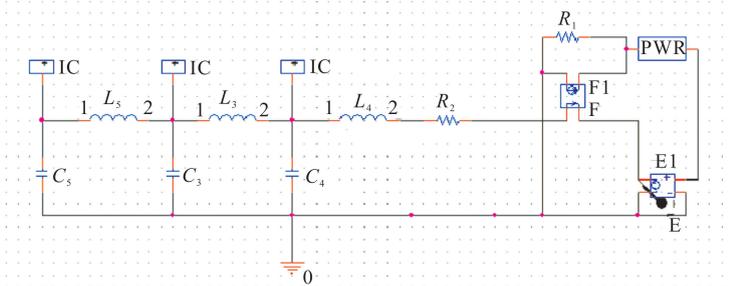


Fig. 3 Schematic diagram of PFN simulation circuit

图 3 PFN 仿真电路图原理图

电路中具体参数设置如下:电容 $C_3 = 30 \mu\text{F}; C_4 = 30 \mu\text{F}; C_5 = 30 \mu\text{F}$;电感 $L_3 = 20 \mu\text{H}; L_4 = 18 \mu\text{H}; L_5 = 20$

μH ; 电阻 $R_2=0.8\ \Omega$ 为回路电阻; 工作电压 $V=3.4\ \text{kV}$; 脉冲氙灯规格 $\phi 6\ \text{mm}\times 120\ \text{mm}$ 。

利用公式 $K_0=1.28\frac{l}{d}\left(\frac{P}{450}\right)^{0.2}$ 计算出氙灯电阻系数 $K_0=23.6\ \Omega\cdot\text{A}^{0.5}$ 。氙灯负载模型如图 4 所示, 仿真波形如图 5 所示, 示波器实测波形如图 6 所示。

一般理想的放电回路要满足临界阻尼条件, 图 5 和图 6 放电电流图显示第一个电流波峰高, 放电电流波形有 2 个明显的峰值, 这与三节 PFN 电路临界阻尼条件下放电波形存在一些差异。为了更接近实际测试要求, 把电路中第一个放电电感 L_4 电感量减少, 其目的是提高第一个电流的峰值。

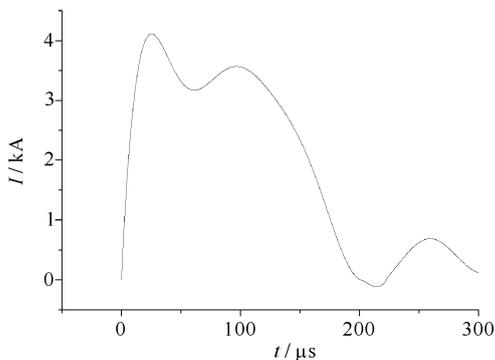


Fig. 5 Discharge current waveform of PFN simulation circuit
图 5 PFN 仿真电路放电电流波形

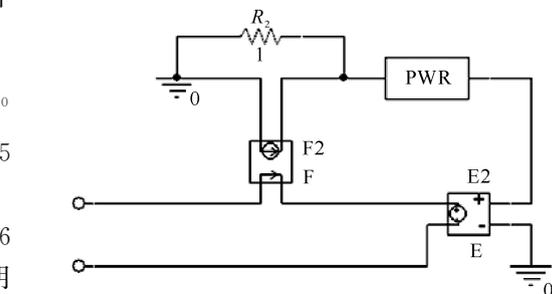


Fig. 4 Xenon lamp load model
图 4 氙灯负载模型

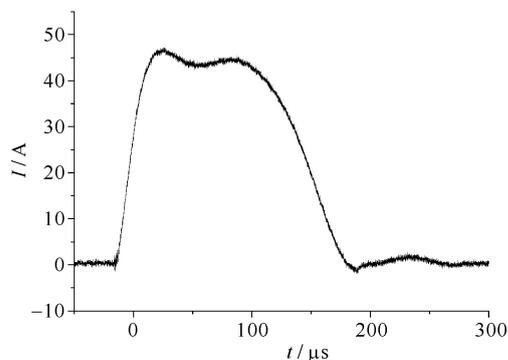


Fig. 6 Discharge waveform of actual discharge current
图 6 实际放电电流放电波形

表 1 放电参数比较

Table 1 Comparison of discharge parameters

	peak current/kA	pulse width/ μs	rise time/ μs
simulation value	4.67	200	23.5
measured value	4.60	200	25.0

通过对表 1 电流波形、放电脉宽及上升沿时间数据比较, 可以看出仿真实验结果与实际测量的数据基本一致, 仿真模型具有较高的精度, 仿真数据对电路的设计与优化具有一定的参考和指导意义。

2.2 充电机控制电路

充电机是整个电源中最重要的一部分, 充电机向电容器充电, 完成电压的提升。充电机是一个高压开关电源, 具有恒流充电特性, 可以预设充电电压值, 同时具备自停和自升的功能。

充电机工作原理图如图 7 所示, 图中 R_1 和 R_2 是预设电阻参数, 旋转可调电阻 R_2 使充电电压值达到预设电压值。当充电机开始工作并到达预设电压值时充电按钮“充电显示”达值, 充电停止。电压保持并等待下一步状态, 如果电压等待的时间较长, 电压值会有所下降, 此时充电机会补偿下降的那部分电压, 使电压保持在预设的电压值, 从而能很好地实现充电机充电自停和自升功能, 具体的实施是通过充电机电源主板上的 DB9 接口来实现相应的控制功能。DB9 控制及外围电路如图 8 所示。

2.3 高压同步触发电路

高压同步触发电路决定氙灯触发是否可靠, 同时保证触发信号的同步性, 尽量减少放电回路之间的延时^[9]。在电路中采用大功率晶闸管作为触发元器件, 晶闸管能承受的电压和电流容量仍然是目前电力电子器件中最高的, 而且工作可靠, 因此在大容量的应用场合仍然具有重要的地位^[10]。

电路原理如图 9 所示, 其工作过程是充电机经 L_1, L_2, L_3 分别对 C_9, C_{10}, C_{11} 充电, 充电电压经 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 四个串联可控硅加到氙灯电极两端, 等待外部触发信号。220 V 市电整流经充电电阻 R_7 及电容 C_6 滤波之后对电容 C_7 储能; 当外部输入一个脉冲信号经 R_5 使场效应管 Q_5 导通工作, Q_5 的 S 端产生驱动信号经 D_6 , 此时储能电容 C_7 放电并输出脉冲信号, 同时在变压器 T_1, T_2, T_3, T_4 次级端经半波整流产生的脉冲信号驱动 Q_1 ,

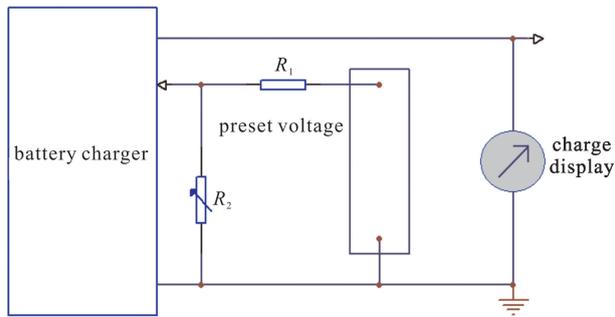


Fig. 7 Working principle of the charger
图 7 充电机工作原理图

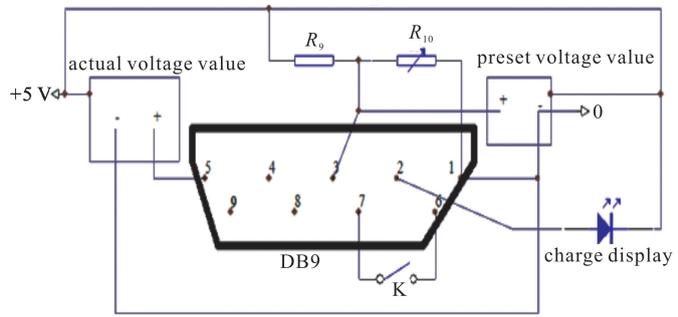


Fig. 8 DB9 control and peripheral circuit
图 8 DB9 控制及外围电路

Q_2, Q_3, Q_4 可控硅, 使可控硅瞬间导通; 同时在脉冲变压器 T_5 次级产生的脉冲信号触发可控硅 Q_6 , 可控硅导通使储能电容 C_8 放电, 同时在 1 : 30 脉冲变压器初级放电, 在次级端产生约 17 kV 的高频高压脉冲信号加载在负载氙灯触发丝上, 瞬间氙灯击穿放电。

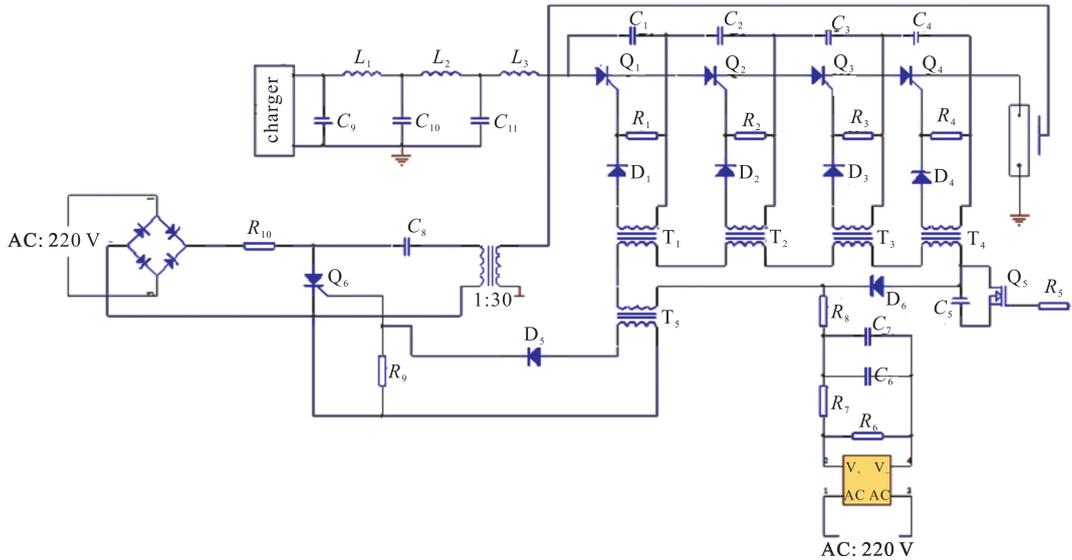


Fig. 9 High voltage synchronous trigger circuit
图 9 高压同步触发电路

为了确保触发信号的同步, 在电路中采用四个大功率晶闸管串联保证了驱动晶闸管时驱动的一致性, 一旦驱动信号出现不一致, 只要单个晶闸管提前导通了, 就会导致其他晶闸管承受不住高压, 直接被高压击穿。

3 实验分析

试验中选用 $\phi 6 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 直管收缩弧脉冲氙灯, 因为收缩弧氙灯工艺的特殊性, 氙灯电极附近处存在死区, 所以氙灯的 K_0 下降, 同时收缩弧氙灯放电能保证有效光路能完全进入高速摄影相机中。测量脉冲氙灯

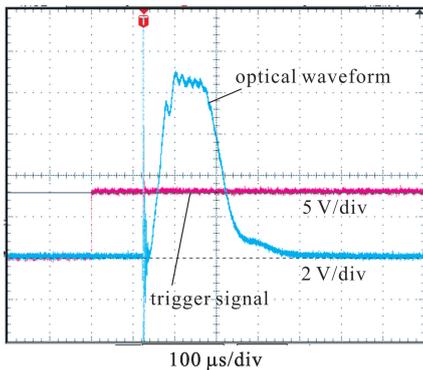


Fig. 10 Trigger signal and 125 μs delay time of optical waveform
图 10 触发信号与光波形延时时间 125 μs

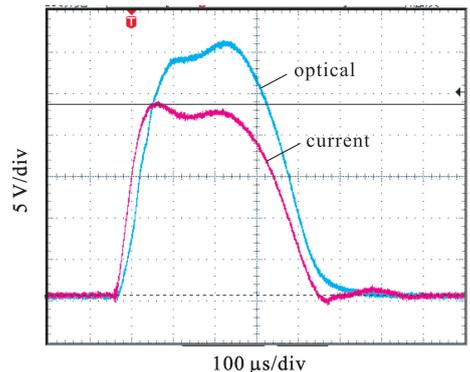


Fig. 11 Current and optical waveforms
图 11 电流与光波形实测波形

在不同电压条件下的放电参数。图 10 在工作电压 3.5 kV 下实测的电流和光波形,其中选用美国 Person 1423 电流环检测电流放电波形,用强流光电管检测光信号,对电源整机进行调试后,其各项技术指标均达到使用要求,电源运行稳定可靠。电源在手动单次触发模式下,在不同的工作电压条件下,对各项电光参数进行检测,具体测试数据如表 2 所示,触发信号(TTL 信号)与光波形的延时时间如图 11 所示,光波形顶部没有电流方波平滑,图中的光波形衰减震荡,原因是在低电压工作条件下,氙灯在放电过程中放电等离子体柱不断充盈受灯管内壁约束后产生振荡,在受到灯管内壁约束后产生等离子体冲击波,导致放电沟道边界发生周期性波动。

表 2 实验测试数据

Table 2 Experimental test data

supply voltage/kV	optical peak value/V	peak current/kA	1/3 pulse width/ μ s	rising edge of optical waveform/ μ s
1.5	13.0	1.72	158	30.4
2.5	34.6	3.16	155	22.4
3.4	56.6	4.60	155	17.6

4 结 论

本文基于脉冲氙灯放电基本工作原理,研制了一台用于高速摄影的脉冲氙灯电源。实验证明,该电源电路结构简单,具有手动和同步触发功能特性,充电电压最高充电 3.5 kV,脉冲氙灯输出的光脉冲信号为准方波脉冲,光脉冲与触发信号延时时间 125 μ s,负载采用特殊工艺的收缩弧直管氙灯。实验结果能满足高速摄影工作要求,同时验证了电源设计的合理性。

参考文献:

- [1] 李波,李博婷,黄斌,等.高可靠性脉冲氙灯电源设计[J].强激光与粒子束,2017,29:065004. (Li Bo, Li Boting, Huang Bin, et al. Design of high reliability pulse xenon lamp power supply. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29:065004)
- [2] 林文正.高速摄影照明光源的特性[J].光子学报,1986,15(4):16-21,24. (Lin Wenzheng. Characteristics of lighting sources for high-speed photography. Acta Photonica Sinica, 1986, 15(4):16-21,24)
- [3] 孙玲,包志华,张威.电路 PSpice 仿真实训教程[M].北京:高等教育出版社,2013. (Sun Ling, Bao Zhihua, Zhang Wei. PSpice circuit simulation training course. Beijing: Higher Education Press, 2013)
- [4] 李玺钦,赵娟,吴红光,等.触发预电离一体化脉冲氙灯电源设计[J].强激光与粒子束,2014,26:075004. (Li Xi-qin, Zhao Juan, Wu Hong-guang, et al. Design of xenon flash lamp supply adopting integrally triggering and pre-ionization. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26:075004)
- [5] 周大明.光源原理设计[M].上海:复旦大学出版社,2006. (Zhou Taiming. Principle design of light source. Shanghai: Fudan University Press, 2006)
- [6] 克希耐尔.W.固体激光工程[M].北京:科学出版社,2002. (Koechner W. Solid-state laser engineering. Beijing: Science Press, 2002)
- [7] 王维昌,赵锦成.脉冲形成网路放电特性研究[J].现代电子技术,2015,38(1):144-146. (Wang Weichang, Zhao Jincheng. Discharge characteristics of pulse-forming network. Modern Electronics Technique, 2015, 38(1):144-146)
- [8] 曹曙光,邵若燕,林文正,等.高功率脉冲氙灯的动态 Pspice 模型研究[J].应用激光,2006,26(6):457-459. (Cao Shuguang, Shao Ruoyan, Lin Wenzheng, et al. Study on the dynamic model of high power flash lamp for simulation with Pspice. Applied Laser, 2006, 26(6):457-459)
- [9] 赵军平,章林文,李劲.基于 MOSFET 的固体开关技术实验研究[J].强激光与粒子束,2004,16(11):1481-1484. (Zhao Junping, Zhang Linwen, Li Jin. Experiment on MOSFET solid switch. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(11):1481-1484)
- [10] 黄垂兵,潘启军,马名中,等.一种大功率晶闸管触发电路设计[J].海军工程大学学报,2014,26(2):15-24. (Huang Chuibing, Pan Qijun, Ma Mingzhong, et al. Design of a triggering circuit for high-power thyristor switch. Journal of Naval University of Engineering, 2014, 26(2):15-24)