

What is the most powerful laser researchers can build?

人们能够建成最强的激光吗?

蒋红兵

北京大学物理学院, 介观物理国家重点实验室, 北京 100871

E-mail: hbjiang@pku.edu.cn

2017-03-09 收稿, 2017-03-14 修回, 2017-03-15 接受, 2017-05-09 网络版发表

摘要 “理论预言激光足够强时可以从真空中产生正负电子对, 但没有人知道是否可以实现”。本文回顾了从真空中产生正负电子对相关的理论发展, 以及理论上要求的激光条件, 和目前激光达到的条件: 施温格推导出当准静电场达到量子电动力学关键场 $E_s = m_e^2 c^3 / e\hbar = 1.32 \times 10^{16}$ V/cm(对应场强 $I_s = 4.65 \times 10^{29}$ W/cm²)时, 正负电子对可以从真空中产生; 单束聚焦激光产生正负电子对阈值光强约为 5×10^{27} W/cm²; 两束相向传输的激光同时聚焦到同一点, 对应的单束光强阈值约为 10^{26} W/cm²。考虑到只要有一对正负电子产生, 其在激光场作用下的级联过程将耗尽激光场能, 使最高的激光场强不能高于约 3×10^{26} W/cm²。目前国际上最高激光功率是由钛蓝宝石激光经过多级啁啾脉冲放大获得, 为5.13 PW, 对应光强在 10^{24} W/cm²。国际上有几个大的激光项目, 近几年目标是10~15 PW, 远期目标百拍瓦到艾瓦。远期目标获得的光强可以产生正负电子对, 但是能否实现仍然未知。

关键词 正负电子对, 最强激光, 施温格效应

2005年, 为庆祝Science创刊125周年, 该刊杂志社于7月1日发表了专辑。其中公布了编辑部选出的其后25年人类将致力于解决的125个最具挑战性的科学问题。第39个问题是: 人们能够制造最强的激光吗? 此问题的简单注解为: “理论学家预言激光足够强时能够从真空中产生正负电子对(电子-质子对), 但是没有人知道这点是否可以真的实现。”

早在1931年索特(Sauter)^[1]讨论了强电场从真空中产生正负电子对的可能性。对静态或准静态均匀电场下正负电子对的产生几率, 海森堡(Heisenberg)和欧拉(Euler)^[2]进行了近似计算, 而施温格(Schwinger)^[3]推导了正负电子对产生几率的准确的公式。自此这个过程经常被称作施温格效应(Schwinger effect)。当电场强度接近量子电动力学的关键场(critical), 即 $E_s = m_e^2 c^3 / e\hbar = 1.32 \times 10^{16}$ V/cm, 其对应的场强为 $I_s = cE_s^2 / 4\pi = 4.65 \times 10^{29}$ W/cm²时, 正负电子对可以产生。其后很多年人们认为这是不可能实现的, 因为其要

求的场强太高了, 于是人们开始研究时间交变场下正负电子对的产生^[4~9]。研究表明, 在电场小于 E_s 时正负电子对产生几率与电场交变频率几乎无关。随着激光的产生和激光技术的发展, 激光的光强越来越高, 是其他任何方法产生的场强无法企及的, 使真空中产生正负电子对的可能出现了一线希望, 也推动了理论的发展。空间均匀的电磁场无法产生正负电子对, 因为横波电磁场的共同作用下电子无法有效获得能量, 但聚焦激光可以, 其光强阈值与聚焦条件和脉宽有关。单束激光聚焦从真空中产生正负电子对的光强阈值为 5×10^{27} W/cm²(波长1 μ m, 脉宽10 fs, 聚焦参数 $\Delta = 0.1$ 时, $\Delta = R/L$, $L = 2\pi R^2 / \lambda$, 其中 R 为聚焦光斑半径)^[10], 比量子电动力学关键场强下降了两个量级。当然, 直接比较是不合理的, 因为以上聚焦场考虑了焦点区域和脉宽时间内产生几率之总和, 而 E_s 对应的是康普顿(Kompton)四维空间 $V_c T_c = I_c^4 / c$ 内产生正负电子对的阈值。随后, 理论上提出用两束相

引用格式: 蒋红兵. 人们能够建成最强的激光吗? 科学通报, 2017, 62: 2050–2054

Jiang H B. What is the most powerful laser researchers can build (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2017, 62: 2050–2054, doi: 10.1360/N972017-00273

向传播的激光脉冲同时聚焦到同一点,可以使阈值场强进一步降低到每束光 10^{26} W/cm² (与以上单束激光相同波长脉宽和聚焦参数)^[11]. 两束相向传输的激光会形成驻波,在波节处电场最强而磁场为零,此时电场不变量 $\mathcal{E}$ 大大增加,从而使阈值大大降低. 2010年Bulanov等人^[12]提出多路激光可以使阈值场强更为降低. 用一定空间配置的24束超短脉冲同时聚焦到同一点,对波长为1 μ m脉宽10 fs的光脉冲,产生一对正负电子需要每束光的阈值能量为5.1 kJ,对应阈值功率每束500 PW (1 PW= 10^{15} W), (聚焦参数 $\Delta=0.3$),比相同聚焦条件只用双束光配置下每束光阈值40 kJ降低了近一个量级. 也有研究认为,只要有一对正负电子,在 5×10^{25} W/cm²的激光场作用下将会引起许多级联的量子电动力学效应,从而耗尽激光场,使激光场不能超过 3×10^{26} W/cm²^[13]. 从而 3×10^{26} W/cm²就将是人们所能获得的最强光强. 这一光强人们是否能够达到,取决于激光技术的发展.

自1960年激光产生以来,高能量和高功率一直是人们为之奋斗的方向. 获得高的功率的主要方法是使能量集中在小的时间范围内,即短脉冲中,所以超短脉冲也是人们一直为之努力的方向. 截至目前,产生高光强超短脉冲主要有两种技术,分别为调Q(Q-Switch)和锁(mode-locking)模技术. 1953年汤斯(Townes)研制成功微波激射器(Maser)以后,人们开始致力于将其推广到光波段,产生激光. 与此同时,科学家已经开始考虑怎么产生超短脉冲. 调Q技术是最早被提出的产生超短脉冲的技术. 1958年古尔德戈登(Gordon Gould)^[14]提出调Q, 1960年梅曼研制成功红宝石激光之后,紧接着赫尔沃思(Hellwarth)和麦克拉姆(McClung)^[15]于1962年研制成功调Q的红宝石激光器. 这里的Q是激光器谐振腔的品质因子,高(低)Q意味着低(高)损耗. 调Q的基本原理是在泵浦开始时使谐振腔处于高损耗,无法产生激光振荡,从而使反转粒子数积累到比较高的水平. 当反转离子数达到最高时,突然降低谐振腔损耗降低,光脉冲迅速建立,产生巨脉冲. 调Q一般用来产生纳秒脉冲. 为获得更高的功率,调Q技术产生的纳秒激光脉冲可以再多次通过增益介质获得放大. 目前国际上最高功率的纳秒脉冲激光器在美国的劳伦斯利弗莫尔国家实验室,为激光点火技术而建(NIF: National Ignition Facility). 激光包含192束钕玻璃放大的光束,2009年其总能量达到 10^6 J,脉宽纳秒,即单脉冲 10^4 J([https://lasers.](https://lasers.llnl.gov/)

llnl.gov/). 不过对单路光来讲,在2003年已产生四束放大激光,其中每束光10 kJ. 目前世界上最高功率的激光是飞秒激光,其放大级的泵浦源就是纳秒激光.

调Q技术用来产生纳秒脉冲,要想产生更短的脉冲,需要锁模技术. 锁模技术是通过锁定谐振腔纵模的相对相位从而实现超短脉冲. 对于一个谐振腔,其纵模间隔是固定的,当参与激光运行的纵模的相位被锁定在一起时,由于纵模之间的干涉,其输出时间间隔固定的光脉冲序列,其间隔为光在腔内运行一周的时间,而光脉冲的脉宽被大大压缩. 1964年迪多梅尼科(DiDomenico)^[16]指出当腔内损耗周期性调制,且调制频率为纵模间隔整数倍时可以实现锁模,同年哈格罗夫(Hargrove)等人^[17]实现了锁模. 其后锁模技术得到很快发展. 被锁定的模式越多,可以获得的脉宽越短. 锁模可以获得皮秒至飞秒级脉冲. 为获得飞秒级脉冲输出,要求增益介质有足够宽的带宽. 目前最常用的高功率飞秒激光介质是钛蓝宝石,其增益带宽可以支撑几个周期的激光脉冲. 飞秒钛蓝宝石激光锁模方式是克尔效应锁模(克尔效应是一种三阶非线性光学效应),即通过克尔效应将不同纵模相对相位锁定. 激光器直接输出的光功率比较低,要获得高功率需对飞秒激光进行放大. 然而,放大以后功率太高又会损伤激光晶体和其他腔内光学元件. 1985年提出了啁啾脉冲放大CPA (chirped-pulse amplification)技术解决了这一难题^[18]. 这一技术利用色散使脉宽展宽成长脉冲然后放大,放大后再压缩回飞秒脉冲. 自此以后,飞秒激光功率得到快速提高. 目前飞秒激光放大方法主要有两种:一种是啁啾脉冲放大,即展宽的长脉冲通过增益介质得到放大;另一种是啁啾脉冲参量放大(optical parametric-chirped pulse amplification, OPCPA),即频率为 γ_1 的泵浦激光和脉宽展宽的频率为 γ_2 的信号光同时输入的合适的晶体,放大信号光同时产生频率为 $\gamma_1-\gamma_2$ 的闲频光. 利用OPCAP技术的往往是先用CPA技术放大,最后再用OPCPA放大. 2005年Science提出125个科学问题时,飞秒激光最高功率是通过CPA技术获得的0.85 PW,脉宽是33 fs^[19]. 目前发表的最高纪录是2015年中国科学院上海光学精密机械研究所报道的用CPA技术产生的5.13 PW (192.3 J)^[20]. CPA技术放大激光能量,原理上可通过增加增益介质的直径来增加允许的光强,然而增益介质直径大了,其横向寄生振荡会制约激光的能量. 目前的中国科学院上海光学精密机械

研究所的报道已经接近放大极限. 在此基础上用OPCPA再次放大有望实现10~15 PW的目标.

由于产生大功率飞秒激光需要很大的经济投入, 全世界只有几个项目在往单束光10 PW努力. 有中国的中国科学院上海光学精密机械研究所^[21], 欧洲的ELI(Extrem Light Infrastructur)(<http://www.eli-beams.eu/science/lasers/>), 俄罗斯的XCELS(Exawatt Center for Extrem Light Studies)(<http://www.xcels.iapras.ru>), 英国的Vulcan^[22], 法国的Apollon装置^[23], 下面主要介绍两个大的规划ELI和XCELS.

ELI计划是2006年欧盟10多个国家联合提出的, 其主要目标之一就是Schwinger真空结构研究. ELI计划下设4大研究装置, 2012年以来已陆续启动三大装置, 其中单束激光的目标是通过CPA和OPCPA技术获得10 PW的激光输出, 预计于2017年完成. 第四个装置的技术目标未定, 需取决于激光技术的发展, 以及前三大装置的运行情况等. 大概的功率目标是比前面的高一个量级以上. 可见前三大装置是近期目标, 而第四大装置则为远期目标. Schwinger真空结构研究即包含在第四大装置计划中.

XCELS是俄罗斯的计划, 国际上不少机构参与并提供15%的费用. 近期目标是2016年实现两束10 PW输出, 2019年同时输出12束, 每束15 PW, 最终获

得180 PW, 最高200 PW的输出. 在15 PW激光建成之后, XCELS计划中一个研究项目是用PW级激光与等离子体相互作用来实现频率上转换和脉宽压缩, 计划于2023年实现1 EW($1 \text{ EW}=10^{18} \text{ W}$)超短脉冲输出, 从而获得聚焦强度 $10^{26}\sim 10^{27} \text{ W/cm}^2$, 两束这样的光相向传输聚焦到同一点可以达到理论要求的于真空中产生正负电子对的强度. 用PW级激光与相对论运动等离子体相互作用来实现频率上转换和脉宽压缩, 理论上有不少研究^[23~26], 是否能够实现还需等待实验的验证.

随着近年来激光功率的不断提高, 真空中产生正负电子对越来越有希望, 也越来越得到人们的关注^[27~31].

从以上计划可以看出, 基于目前激光技术的发展有把握于近期获得单束10~15 PW的光输出, 其聚焦强度可达 10^{24} W/cm^2 , 比达到用两束光产生正负电子对的阈值低两个量级. XCELS计划给出了产生艾瓦脉冲的技术路线——利用激光与相对论等离子体相互作用来实现频率转换和脉宽压缩, 这一方法可行性有待于实验验证. 和2005年提出问题相比, ELI和XCELS已将用激光产生正负电子对列入计划, 这是很大的进展, 不过未来14年实验上是否能实现还不明确, 但这不妨碍人们充满信心地为之努力.

参考文献

- 1 Sauter F. The behavior of an electron in a homogeneous electric field to the relativistic theory of Dirac. *Z Phys*, 1931, 69: 742–764
- 2 Heisenberg W, Euler H. Drawn from the Dirac theory of the positron. *Z Phys*, 1936, 98: 714–732
- 3 Schwinger J. On gauge invariance and vacuum polarization. *Phys Rev*, 1951, 82: 664–679
- 4 Brezin E, Itzykson C. Pair production in vacuum by an alternating field. *Phys Rev D*, 1970, 2: 1191
- 5 Mostepanenko V M, Frolov V M. Production of particles from vacuum by a uniform electric-field with periodic time-dependence. *Sov J Nucl Phys*, 1974, 19: 451–456
- 6 Marinov M S, Popov V S. Electron-positron pair creation from vacuum induced by variable electric-field. *Fortschr Phys*, 1977, 25: 373–400
- 7 Grib A A, Mamaev S G, Mostepanenko V M. *Vacuum Quantum Effects In Strong Fields*. Moscow: Friedmann Laboratory, 1988
- 8 Ringwald A. Pair production from vacuum at the focus of an X-ray free electron laser. *Phys Lett B*, 2001, 510: 107–116
- 9 Popov V S. Schwinger mechanism of electron-positron pair production by the field of optical and X-ray lasers in vacuum. *JETP Lett*, 2001, 74: 133–138
- 10 Narozhny N B, Bulanov S S, Mur V D, et al. e^+e^- pair production by a focused laser pulse in vacuum. *Phys Lett A*, 2004, 330: 1–6
- 11 Bulanov S S, Narozhny N B, Mur V D, et al. On e^+e^- pair production by colliding electromagnetic pulses. *JETP Lett*, 2004, 80: 382–385
- 12 Bulanov S S, Mur V D, Narozhny N B, et al. Multiple colliding electromagnetic pulses: A way to lower the threshold of e^+e^- pair production from vacuum. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 220404
- 13 Narozhny N B, Fedotov A M. Creation of electron-positron plasma with superstrong laser field. *Eur Phys J Special Topics*, 2014, 223: 1083–1092
- 14 Taylor N. *LASER: The Inventor, the Nobel Laureate, and the Thirty-Year Patent War*. New York: Simon & Schuster, 2000

-
- 15 McClung F J, Hellwarth R W. Giant optical pulsations from ruby. J App Phys, 1962, 33: 828–829
 - 16 DiDomenico M. Small-signal analysis of internal (coupling-type) modulation of lasers. J Appl Phys, 1964, 35: 2870–2871
 - 17 Hargrove L E, Fork P L, Pollack M A. Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation. Appl Phys Lett, 1964, 5: 4–5
 - 18 Strichland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses. Opt Commun, 1985, 56: 219–221
 - 19 Aoyama M, Yamakawa K, Akahane Y, et al. 0.85 PW, 33 fs Ti: sapphire laser. Opt Lett, 2003, 28: 1594–1596
 - 20 Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, et al. High-energy large-aperture Ti:sapphire amplifier for 5 PW laser pulses. Opt Lett, 2015, 40: 5011–5014
 - 21 Xu L, Yu L H, Liang X Y, et al. High-energy noncollinear optical parametric-chirped pulse amplification in LBO at 800 nm. Opt Lett, 2013, 38: 4837–4840
 - 22 Hernandez-Gomez C, Blake S P, Chekhlov, et al. The vulcan 10 PW project. J Phys Conf Ser, 2010, 244: 032006
 - 23 Bulanov S V, Esirkepov T Z, Kando M, et al. Relativistic mirrors in laser plasmas analytical methods. Plasma Sources Sci Technol, 2016, 25: 053001
 - 24 Kando M, Fukuda Y, Pirozhkov A S. Demonstration of laser-frequency upshift by electron-density modulations in a plasma wakefield. Phys Rev Lett, 2007, 99: 135001
 - 25 Kulagin V V, Cherepenin V A, Hur M S. Flying mirror model for interaction of a super-intense nonadiabatic laser pulse with a thin plasma layer: Dynamics of electrons in a linearly polarized external field. Phys Plasmas, 2007, 14: 113101
 - 26 Kulagin V V, Cherepenin V A, Hur M S. Flying mirror model for interaction of a super-intense laser pulse with a thin plasma layer: Transparency and shaping of linearly polarized laser pulses. Phys Plasmas, 2007, 14: 113102
 - 27 Yu T, Lee S K, Sung J H, et al. Generation of high-contrast, 30 fs, 1.5 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti: Sapphire laser. Opt Lett, 2012, 20: 10807
 - 28 Bulanov S V, Esirkepov T Z, Hayashi Y. Extreme field science. Plasma Phys Control Fusion, 2011, 53: 124025
 - 29 Liang E. Intense laser pair creation and applications. High Energy Density Phys, 2010, 6: 219–222
 - 30 Bulanov S S, Esirkepov T Z, Thomas A G R, et al. Schwinger limit attainability with extreme power lasers. Phys Rev Lett, 2010, 105: 220407
 - 31 Popov V S, Mu V D, Narozhnyi N B, et al. Electron-positron pair production from vacuum in the field of high-intensity laser radiation. J Exp Theor Phys, 2016, 122: 539–553



蒋红兵

北京大学物理学院教授。1994 年于复旦大学物理系获得物理学博士。2000 年 10 月起在北京大学物理学院现代光学研究所工作，从事飞秒激光在透明介质中非线性传输与微加工，飞秒激光分子取向及应用，飞秒激光传输引起的氮气离子超荧光的物理过程研究。

Summary for “人们能够建成最强的激光吗?”

What is the most powerful laser researchers can build?

JIANG HongBing

State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

E-mail: hbjiang@pku.edu.cn

“Theorists say an intense enough laser field would rip photons into electron-positron pairs, dousing the beam. But no one knows whether it’s possible to reach that point.” The theory about electron-positron generation from vacuum is reviewed, also the developing of laser intensity. Schwinger predicted that electron-positron pair would be produced from the vacuum when the field near the critical QED field $E_s = m_e^2 c^3 / e \hbar = 1.32 \times 10^{16}$ V/cm (the corresponding intensity $I_s = 4.65 \times 10^{29}$ W/cm²). The threshold to generate electron-positron pairs is about 5×10^{27} W/cm² for single focused laser beam, and about 10^{26} W/cm² for a pair of colliding laser pulses. When one electron-positron pair is generated, it would induce cascade effect under such strong laser field which would deplete energy of the field, so the highest intensity would be about 3×10^{26} W/cm². The highest power people have reached is 5.13 PW, the corresponding intensity is about 10^{24} W/cm², which was obtained by Chirped Pulse Amplification from Ti: Sapphire laser system. There are several projects in the world to generate 10–15 PW laser in the next few years, and several hundred PW to one Exawatt in the far future which would obtain laser intensity of 10^{26} – 10^{27} W/cm². It is still not clear if the far future aim could be reached.

electron-positron pairs, most powerful laser, Schwinger effect

doi: 10.1360/N972017-00273