

雷射發展簡史

張連璧

輔仁大學 物理系

摘 要

雷射發明距今已將近一甲子。無論在科學研究、工業應用、民眾的娛樂及民生醫療等到處都可以見到雷射的身影。尤其是雷射二極體的發明成就了光纖通訊，加速了網際網路的興起，大大地影響了人們的日常生活。如果沒有雷射的發明，近日重力波的直接偵測也不可能實現。本文簡單回顧雷射發展的歷史及幾則不為人熟知的趣事。

關鍵詞：雷射、歷史、雷射二極體

愛因斯坦於 1916-1917 年間重新推導 Planck 的黑體輻射公式時，首次提出受激輻射的可能性[1-2]。德國物理學家 Kopfermann 和 Ladenburg 於 1928 年在研究氬氣放電過程中證實了負色散(negative dispersion)現象，這給受激輻射提供了證據[3]。

雖然早在 1930 年以前，建造雷射所有必須具備的概念都有了，但是直到 1960 年全世界第一台雷射才誕生。

發明鐳射(MASER)的諾貝爾獎得主 Charles H. Townes 認為主要的障礙是研製雷射除了需要量子力學的相關知識外，還需要電機方面的知識與技術。在早期，這兩個領域彼此配合的不融洽，而且許多物理學家對於受激輻射的雷射光束是否具有相干性(事實上，受激輻射的相干性是可以從量子力學推導出來的)還有極大的懷疑，因此無法看到雷射光束的重要特性，甚至有不少偉大的物理學家，像是 Niels Bohr、John Von Neumann、I.I. Rabi 及 Polykarp Kusch (其中三位是諾貝爾物理獎得主)等，還認為 Townes 的想法有問題，根本不可能做出鐳射來[4]。

1951 年美國的 Townes 想出利用氨氣分子(NH_3)產生微波受激放大的方法。三年後，Townes 和他的研究生 J. Gordon 及博士後研究 H. Zeiger 成功地建造出所謂的鐳射(microwave amplification by stimulated emission of radiation)，震驚了整個科學界[5]。"MASER" 這個首字母縮寫詞是此時 Townes 所想出來描述這個新穎的發明。蘇聯的物理學家 Nikolay Basov 和 Alexander Prokhorov 也在同一時期，獨立發展鐳射的理論基礎；同樣也是

利用氦氣分子作為增益介質，建造出鎂射。

1964 年 Charles H. Townes、Nikolay G. Basov 和 Alexander M. Prokhorov 共同分享諾貝爾物理獎的榮耀。得獎理由：為量子電子學奠定了基礎，進一步應用鎂射-雷射的原理，建造出振盪器(即鎂射或雷射)及(微波或光)放大器。

1956 年 Nicolaas Bloembergen 提出三階(3-level)固態鎂射的構想[6]，讓鎂射及微波放大器的架構造變得簡單多了，並且隨後也應用在雷射的設計上。

1958 年 A. Schawlow 和 Charles H. Townes 發表了一篇理論計算的文章[7]，論文名稱為”紅外及可見光鎂射”，文中建議使用 Fabry-Pérot 腔(由兩片高反射的平面鏡所組成)做為共振腔，但文中並未使用‘LASER’一詞。最早使用“LASER”一詞的是一位哥大(美國哥倫比亞大學)物理系的博士生 Gordon Gould，他的指導教授是 Polykarp Kusch。Gould 在他的筆記本第一頁的最上方寫著：LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation。他也是在公開的研討會上首先使用 LASER 一詞的人[8]。

在鎂射成功地研製出來之後，投入量子電子學領域研究的團體或個人也愈來愈多。在雷射研發的激烈競爭下，大家都想要拔得頭籌，但是最先研製出第一台可見光雷射的人，不是 Schawlow 和 Townes 的研究團隊，也不是 Gould 本人，也不是擁有龐大研究資源的 Bell Labs. 的研究團隊，而是

一位在加州 Hughes 研究實驗室從事研究工作的物理學家 Theodore Maiman。他於 1960 年 5 月 16 日成功地研製出脈衝式紅寶石雷射，輸出的雷射光其波長為 694.3 nm 的紅光，並將成果發表在同年八月的 Nature 期刊上[9]。加州理工學院的教授，也是早期在 Bell Labs. 參與雷射研發競賽的 Amnon Yariv 教授曾回憶說[10]:當時在 Bell Labs. 就有三到四組研究群參與競賽，每一組採取不同的研製雷射方法，並且有充分的技術支援。所有的研究人員都全力以赴，希望自己的團隊是最後的雷射競賽贏家，但是所有的人想到的雷射都是連續式的(continuous wave)。就某方面而言，這是互相洗腦的結果。竟然沒有人想到脈衝式的操作方式(pulsed operation)。即使 Schawlow 和 Townes 在他們發表的理論文章裡也沒想到這種激發增益介質的方式[11]。事實上，用脈衝式的方式激發增益介質產生居量反轉(population inversion)的效率遠高於用連續式的方式激發介質，因此更容易產生雷射光。另一個讓 Townes 驚訝的是 Maiman 竟然做到 Schawlow 和 Townes 認為幾乎不可能做到的事——將紅寶石的基態淨得夠"空"，這樣從激發態(高能態)回到基態(低能態)的過程中就可能發生受激輻射。事實上，Schawlow 曾經公開說過：紅寶石的基態不適合做為受激輻射的低能態，因為它的基態很難淨得夠"空"，但他不知道紅寶石的激發態是個相對穩定態(metastable state)，其生命期約 3 毫秒(相當長)，而 Maiman 利用閃光燈激發紅寶石，將基態清得夠"空"以提供足夠的居量反轉，有利於雷射光的產

生[11]。

1960 年底，IBM 研究中心的 P. P. Sorokin 和 M. J. Stevenson 研發出波長 2.49 μm 的脈衝式紅外光雷射。這是世界上的第二台雷射[12]。Bell Labs. 的研究團隊為了要研發出第一台的連續式氣體雷射，首先請 Bell Labs. 的兩位科學家 A. Gardner. Fox 和 Tingye Li 利用電腦模擬計算平面波在 Fabry-Pérot 腔來回傳播，因繞射造成的損耗及傳播過程的演變和結果。成果相當令人興奮並於 1961 年 3 月發表在 Bell System Technical Journal (由美國的電話及電報公司 AT&T 的所發行的內部期刊)上[13]。同年年底，Bell Labs. 的 A. Javan、W. R. Bennett Jr. 和 D. R. Herriott 成功地建造出世界第一台的連續式氦氖雷射，波長 1.15 μm ，輸出功率 15 mW，並證實了 Fox 和 Li 兩人對雷射橫向模態的理論預測[14]。

Nikolay G. Basov 等人於 1961 年首先提出雷射二極體的可能性[15]。

1962 年 General Electric Research Lab 的 Robert N. Hall 研究團隊、IBM 的 Marshall I. Nathan 研究團隊及麻省理工學院 Lincoln Lab 的 Ted. M. Quist 研究團隊陸續發表有關 GaAs 雷射二極體的研究成果[16-18]。這些二極體雷射都必須在低溫下才能操作，而且都是脈衝式的。

1963 年 H. G. HEARD 建造出世界第一台脈衝式紫外光雷射，增益介質是氮氣，波長 337 nm，可在室溫下操作[19]。同年 Herbert Kroemer 提出異質接面的想法，利用異質結構可以大幅增加居量反轉以提高雷射二極體的

發光效率[20]。

1964 年 Bell Labs. 的 J. E. Geusic、H. M. Marcos 和 L. G. Van Uitert 研發第一台 Nd:YAG 雷射，波長 $1.06\ \mu\text{m}$ [21]。同年 Bell Labs. 印度籍的 C. Kumar N. Patel 也發展成功高功率的 CO_2 雷射，波長 $10.6\ \mu\text{m}$ [22]。Hughes Research Labs. 的 William B. Bridges 也在同一年發展出氫離子雷射[23]。

1965 年加州大學柏克萊分校化學系的 Jerome V. V. Kasper 和 George C. Pimentel 利用 $\text{H} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{HCl}^* + \text{Cl}$ 的化學反應，發展出第一台化學雷射，中心波長 $3.77\ \mu\text{m}$ ($2650\ \text{cm}^{-1}$) [24]。

1966 年，IBM 研究中心的 P. P. Sorokin (發明第二台雷射的人) 和 J.R. Lankard 先將 chloro-aluminum phthalocyanine 溶解在乙醇裡，然後以具有極大脈衝能量的紅寶石雷射作為激發光源，激發溶液中的 phthalocyanine 分子，產生受激輻射發出波長為 $0.755\ \mu\text{m}$ 的雷射光，這是第一台染料(dye)雷射[25]。

1970 年，蘇聯科學院 Ioffe 物理技術研究所的 Zh. I. Alferov 研究團隊利用 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 雙異質結構，研發出第一個可在室溫(300 K)操作的連續式半導體雷射[26]。同年蘇聯科學院 Lebedev 物理研究所的 Nikolay Basov 研究團隊利用電子束激發液態氙(Xenon)，產生真空紫外雷射光，波長 $176\ \text{nm}$ ，這是第一台準分子雷射[27]。

1976 年，史丹福大學高能物理實驗室的 John M.J. Madey 研究團隊將一

束電子加速至接近光速(電子能量約 43.5 MeV)，電子束通過由周期性橫向磁場所構成的自由電子振蕩器進行加速，進而發射光子(同步輻射)。由於電子周期運動與已輻射光場同相位，於是光場得到相干疊加，波長 3.4 μm [28]，這是自由電子雷射的原型。

1984 年，加州大學 Lawrence Livermore 國家實驗室的 Dennis L. Matthews 研究團隊利用波長為 532 nm 的綠光雷射，將硒(selenium)箔的原子游離成似氙離子(即與氙原子有相同的電子組態)，在 $2p^53p$ 和 $2p^53s$ 兩個能階間產生居量反轉，釋放出波長為 20.63 nm 和 20.93 nm 的軟 X 射線，號稱世上第一台 X 射線雷射[29]。由於缺乏適當的反射鏡形成振盪器，X 射線雷射的雷射光都只是被放大的自發輻射而已，相干性沒有一般雷射光束好。

1986 年，英國 Southampton 大學電子與資訊系的 Robert J. Mears 研究團隊(領導人是 David N. Payne)，利用摻鉍光纖作為增益介質，研發出世界第一台單模可調式摻鉍光纖雷射(三階系統)，可以連續式操作，也可以脈衝式(Q-switched)操作，中心波長為 1.55 μm ，可調範圍超過 25 nm [30]。摻鉍光纖雷射及放大器的發明奠定了光通訊新的里程碑，促使了通訊及網際網路的發展一日千里。表一列出歷年(到 2017 年)因雷射相關研究或應用而獲得諾貝爾物理獎及得獎理由[32-33]

表一：因雷射相關研究或應用而獲得諾貝爾物理獎及得獎理由。

時間與獎項	獲獎人	得獎原因與理由
1964，物理獎	Charles Hard Townes, Nicolay Gennadiyevich Basov and Aleksandr Mikhailovich Prokhorov	量子電子學的基礎研究，引領振盪器(鐳射或雷射)及(微波或光)放大器的發明。
1971，物理獎	Dennis Gabor	發明及發展全像照像的方法。
1981，物理獎	Nicolaas Bloembergen and Arthur Leonard Schawlow	發展雷射光譜學的貢獻。
1989，物理獎	Norman F. Ramsey	發明分離振盪場方法及其在氫鐳射和其他原子鐘中的應用。 (氫鐳射是一種原子鐘，利用氫原子共振激發時，釋出的超精細微波作為時間及頻率的標準)
1997，物理獎	Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, and William D. Phillips	發展以雷射光捕捉及冷卻原子的方法。
1999，化學獎	Ahmed H. Zewail	利用飛秒雷射光譜技術研究化學反應中的躍遷態。
2000，物理獎	Zhores I. Alferov and Herbert Kroemer	發展用在高速光電子元件上的半導體異質結構。
2001，物理獎	Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle, and Carl E. Wieman	成就玻色-愛因斯坦凝聚及凝聚性質的早期基礎研究。
2005，物理獎	Roy J. Galuber	光相干性的量子理論的貢獻。
2005，物理獎	John L. Hall and Theodore W. Hänsch	發展以雷射為基礎的精密光譜技術及光頻梳技巧的貢獻
2009，物理獎	Charles Kuen Kao	對光在光纖內傳輸之光通訊的開創性成就。
2012，物理獎	Serge Haroche and David J. Wineland	對個別量子系統的測量與操控發展開創性的實驗方法。
2017，物理獎	Rainer Weiss, Barry C. Barish and Kip S. Thorne	對 LIGO 探測器與重力波觀測的決定性貢獻。

參考文獻

1. Einstein, "*Emission and Absorption of Radiation in Quantum Theory*," Verh. d. Deutschen Physikal. Gesellschaft, vol. 18, pp. 318-323, 1916.
2. A. Einstein, "*The Quantum Theory of Radiation*," Phys. Zs., vol. 18, pp. 121-128, 1917.
3. H. Kopfermann and R. Ladenburg, "*Experimental Proof of 'Negative Dispersion'*," Nature, vol. 122, pp. 438-439, 1928.
4. Charles H. Townes, "*Early history of quantum electronics*," J. Modern Opt., vol. 12, pp. 1637-1645, 2005.
5. J. Gordon, H. Zeiger and C. Townes, "*Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave Spectrum of NH₃*," Phys. Rev., vol. 95, pp. 282-285, 1954.
6. Nicolaas Bloembergen, "*Proposal for a New Type Solid State Maser*," Phys. Rev. vol. 104, pp. 324-327, 1956.
7. A. Schawlow and C. Townes, "*Infrared and optical masers*," Phys. Rev. vol. 112, pp. 1940-1949, 1958.
8. Gould, R. Gordon, "*The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*," In Franken, P.A. and Sands, R.H. (Eds.). *The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan, June 15 through June 18*, p. 128, 1959.
9. T. H. Maiman, "*Stimulated Optical Radiation in Ruby*," Nature, vol. 187, pp. 493-494, 1960.
10. Amnon Yariv, "*Catching the Wave*," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol. 6, pp. 1478-1489, 2000.

11. Laura Garwin and Tim Lincoln Eds., *A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World*, pp. 107-112, the University of Chicago Press, 2003.
12. P.P. Sorokin and M.J. Stevenson, "Stimulated Infrared Emission from Trivalent Uranium," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 5, pp. 557-559, 1960.
13. A.G. Fox and Tingye Li, "Resonant Modes in a Maser Interferometer," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 40, pp. 453-488, 1961.
14. A. Javan, W. R. Bennett, Jr., and D. R. Herriott, "Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 6, pp. 106-110, 1961.
15. N.G. Basov, O.N. Krokhin, and Yu.M. Popov, "Production of negative-temperature states in p-n junctions of degenerate semiconductors," *Sov. Phys. JETP*, vol. 13, pp. 1320-1321, 1961.
16. R.N. Hall, G.E. Fenner, J.D. Kingsley, T.J. Soltys, and R.O. Carlson, "Coherent Light Emission from GaAs Junctions," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 9, pp. 366-368, 1962.
17. Marshall I. Nathan, William P. Dumke, Gerald Burns, Frederick H. Dill, Jr., and Gordon Lasher, "Stimulated Emission of Radiation from GaAs p-n Junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 1, pp.62-64, 1962.
18. T.M. Quist, R.H. Rediker, R.J. Keyes, W.E. Krag, B. Lax, A.L. McWhorter, and H.J. Zeigler, "Semiconductor Maser of GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 1, pp. 91-92, 1962.
19. H.G. Heard, "Ultra-violet Gas Laser at Room Temperature," *Nature*, vol. 200, p. 667, 1963.
20. H. Kroemer, "A Proposed Class of Heterojunction Injection Lasers," *Proc. IEEE*, vol. 51, pp. 1782-1783, 1963.

21. J.E. Geusic, H.M. Marcos, L.G. Van Uitert, "*Laser Oscillations in Nd-Doped Yttrium Aluminium, Yttrium Gallium and Gadolinium Garnets,*" Appl. Phys. Lett., vol. 4, p. 182, 1964.
22. C.K.K. Patel, "*Continuous Wave Laser on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂,*" Phys. Rev. vol. 136, pp. A1187-A1193, 1964.
23. William B. Bridges, "*Laser Oscillation in Singly Ionized Argon in the Visible Spectrum,*" Appl. Phys. Lett., vol. 4, pp. 128-130, 1964.
24. Jerome V.V. Kasper and George C. Pimentel, "*HCl Chemical Laser,*" Phys. Rev. Lett., vol. 14, pp. 352-354, 1965.
25. P.P. Sorokin and J.R. Lankard, "*Stimulated Emission Observed from an Organic Dye, Chloro-Aluminum Phthalocyanine,*" IBM J. Res. Dev., vol. 10, pp. 162-163, 1966.
26. Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, D.Z. Garbuzov, Yu.V. Zhilyaev, E.P. Morozov, E.L. Portnoi, and V.G. Trofim, "*Investigation of the Influence of the AlAs-GaAs Heterostructure Parameters on the Laser Threshold Current and the Realization of Continuous Emission at Room Temperature,*" Sov. Phys.-Semicond., vol. 4, pp. 1573-1575, 1971.
27. N.G. Basov, V.A. Danilychev, Yu.M. Popov, and D.D. Khodkevich, "*Laser Operating in the Vacuum Region of the Spectrum by Excitation of Liquid Xenon with an Electron Beam,*" JETP Lett., vol. 12, pp. 329-331, 1970.
28. D.A.G. Deacon, L.R. Elias, J.M.J. Madey, G.J. Ramian, H.A. Schwettman, and T.I. Smith, "*First Operation of a Free-Electron Laser,*" Phys. Rev. Lett., vol. 38, pp. 892-894, 1977.
29. D.L. Mathews et al., "*Demonstration of a Soft X-Ray Amplifier,*" Phys. Rev. Lett., vol. 54, pp. 110-113, 1985.

30. R.J. Mears, L.Reekie, S.B. Poole, and D.N. Payne, “*Low-Threshold Tunable CW and Q-Switched Fiber Laser Operating at 1.55 μm ,*” *Electron. Lett.*, vol. 22, pp. 159-160, 1986.
31. Jeff Hecht, *Understanding Lasers: An Entry-Level Guide*, p. 416, 3rd ed., IEEE Press, and John Wiley and Sons, Inc., 2008.
32. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/
33. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/

A brief history of laser development

Lien-Bee Chang¹

*Department of Physics,
Fu Jen Catholic University,
Taipei 242, Taiwan, ROC*

Abstract

It has almost been six decades since T. H. Maiman invented the world's first ruby laser. Lasers nowadays are everywhere, whether in scientific research, industrial applications, public entertainment or medical treatments. Above all, the invention of laser diodes made fiber-optic communications to become real, accelerated the rise of the Internet, and substantially affected people's daily lives. Moreover, most recently it has not been possible to detect gravitational waves directly without lasers.

This article briefly reviews the history of laser development and several unknown anecdotes.

Key word : lasers; history; laser diodes.

¹ Corresponding author, Tel., +886-2-29052018; fax, +886-2-29021038
E-mail address: lbchang@mail.fju.edu.tw