

半導体レーザーの過去と未来

濱 口 達 史

1. 黎明期

レーザーの起源は、アインシュタインの誘導放出の予言にまでさかのぼることができる¹⁾。反転分布を作り出すことで、光の増幅が可能になるというものだ。半導体の場合は、キャリアを微小な領域に閉じ込めることにより達成される。すなわち、半導体レーザーを作るということは、いかにしてその構造を小さくするかという小型化の探求であった。

初めて半導体レーザーの発振が報告されたのは 1962 年のことで、端面出射型素子であった²⁻⁴⁾。ただし、当時は活性領域にホモ接合を用いており、キャリアの閉じ込めにはまだ洗練の余地があった。その後、縦方向の閉じ込めのためダブルヘテロ構造が得られ、さらに、垂直共振器面発光型素子 (vertical-cavity surface-emitting laser; VCSEL)⁵⁾ において横方向の電流狭窄の改善が進むなど、長年の研究が実を結び、現代においてはサブミリアンペアの閾値電流は珍しいことではなくなったし、近赤外にとどまらずに赤緑青の多様な発光波長が実現可能となった (図 1)。半導体レーザーは超少消費電力での駆動が可能になり、それに伴って発熱も小さく、寿命がよく、実用に耐えうる技術に進化してきた。現在では身近なスマートフォン、小型プロジェクターなどのモバイルデバイスから、手の届かぬ深さにある海底ケーブルまで、世界中のあらゆる所で活用されているのは周知の事実である。

小型化に伴う課題を挙げるとすれば、出射光の放射角の拡大であろう。ハイゼンベルクが不確定性原理を唱えたのは 100 年近く前のことだ⁶⁾。すなわち、光を閉じ込めれば、それに応じて回折が生じ、放射角が広がってしまう。キャリアを狭い領域に閉じ込めるということは、光もまた閉じ込められるということだ。例えば、端面出射型レーザーや VCSEL のビーム幅はおおよそ数 μm である。よって、それらの出射ビームの放射角は数 $^\circ$ 、あるいは 10° 以上へと広がる。そもそも、レーザーの特長のひとつとして直進性がある。産業上の多くの用途において、レーザーは

より狭い角度でまっすぐに進むことが望まれる。よって、これら広角に出射されるレーザーは、実用上はレンズなどと組み合わせて狭放射化した上で用いられることが一般的だ。すなわち、半導体レーザーの小型化が進むほど、一緒に使われる外部の光学系が肥大化しやすいというジレンマがそこにはある。

2. 現在の研究動向

現在において、半導体レーザー研究の関心は、いかにして光の閉じ込めを弱くし、素子の大きさを広げるかという点に移りつつある。その観点で先駆的研究がなされているのがフォトニック結晶面発光レーザー (photonic-crystal surface-emitting laser; PCSEL)⁷⁾ であろう。これは、LED 用の素子にサブ波長周期の穴を配することで大面積素子内でのレーザー発振を実現し、例えば 1° 以下のきわめて放射角の狭いレーザー光を得る方式である。端面出射型レーザーや VCSEL は、2 つの鏡を平行に向かい合わせにして光を共振させ、片方の鏡から光を取り出す共振器構造を有する。すなわち、ファブリー・ペロー型である。ビームの共振方向と出射方向が同じであり、出射方向から見て横方向に光が散逸しないよう、横方から何らかの光閉じ込めがなされている。すなわち、ビーム幅が狭くなる傾向があつて、それに伴ってビームの放射角が広がる。一方で、PCSEL は光の共振方向は基板面内、出射方向は基板法線方向と異なる。出射方向から見て横方向に光が行き交うため、むしろ光は横方向に開放される。よって、ビーム幅の大きな素子を作りやすい。例えばミリメートル級の素子も報告されており、先のレーザーに比べると 3 桁ほどの飛躍を成し遂げている。これに伴って放射角は 1° 以下となり、レンズなど外部光学系の大幅な簡略が可能となっていて、これはきわめて重要な応用上の利点である。

3. 今後の研究動向

とはいえ、議論は堂々巡りだ。光場を大きくするということはそれに伴って電流が行きつくべき領域も大きくなるということである。よって、必要な電流量も増加する。

ソニーグループ株式会社 E-mail: Tatsushi.hamaguchi@sony.com

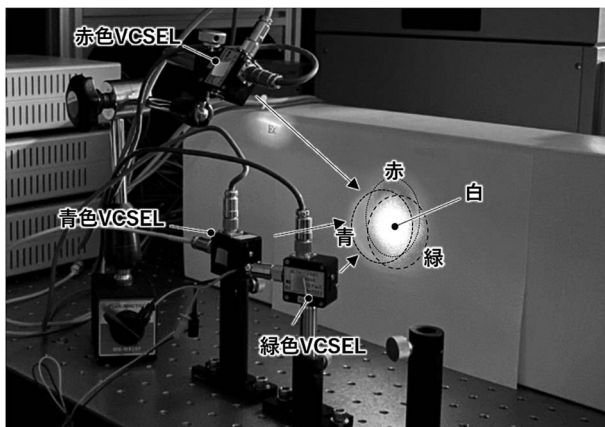


図1 RGB 3色のVCSELを同一箇所へ照射し得られた白色光源¹¹⁾。

ビーム幅に対して放射角は反比例するが、電流注入領域の面積はおおよそ2乗に比例して増加する。つまり、ビーム幅の拡大に伴って素子の消費電力および発熱は加速度的に増大する。キャリアの反転分布を実現するには相応の大きな密度の電流が必要になることも踏まえると、放射角の狭いレーザーはハイパワー用途には向くが発熱に伴う信頼性の問題が心配であるし、消費電力が小さいことが求められがちなディスプレイなどの民生機器の多くでは不利となりうる。

アインシュタインが反転分布を実現するためには素子を小さくせよと説く一方で、ハイゼンベルグは素子の小型化は光の方射角を広げてしまうという。そして、産業上の利便性からは、小型で消費電力が小さく、同時に狭い放射角のレーザーが求められる。いわば三つ巴である。これから未来の半導体レーザー研究は、この三つ巴をいかにして解決するかという命題になお一層向かっていくというのが筆者のひとつの見立てである。

レーザーのコヒーレントアレイ化はそのアプローチのひとつであろう。1つの素子からレーザー光を出すのではなく、ある程度空間的に離れた複数の素子をレーザー発振させ、お互いに位相が一致するように駆動すれば、干渉しあい、外から見ればあたかも巨大な1つのレーザーとして動作し、狭いビームを放射することが可能になる。例えばVCSELの場合は円環状に複数の素子を配置すればその直径に相当する狭いビームを得ることができるし、円環の内部には電流を流し込む必要がないので、素子の巨大化に伴う消費電力の増加といったデメリットも抑制することができる。

このような素子を実現するために、素子間のコヒーレンスを得る方法が複数報告されてきた。もっともストレート

な方法は、複数の素子を同時に駆動させ、別の親レーザーの光をこれらに照射させ、各素子の位相を強制的に同調させるというものである。しかし、この方法ではコヒーレンスは得られるが、複数のレーザーを用いるために装置が大掛かりになることが実用上の足かせとなっている。そこで、親レーザーを必要とせず、1つの基板上に形成した複数の素子で自己完結的に同期する自己同期型のコヒーレントアレイの研究が盛んだ⁸⁾。簡単にいえば、隣接する素子間を自身の迷光で連携させ位同期を得るというものである。サブ波長周期に設けられた穴を用いて光学的な結合を制御し、積極的に素子間の同期を得るという手法も近年盛んである⁹⁾。とはいえ、これらはいずれも数 μm から数十 μm 程度の幅のビームが実現されるのみであり、PCSELのようにミリメートル級には至っておらず、ブレイクスルーが期待される。キャビティー構造の進歩のほかには、材料の発展も重要である。これまで、半導体レーザーはその黎明期にはAs系、P系を中心に研究が立ち上がり、やがて窒化物系も盛んに研究されるようになった。つまり、いずれもIII-V族化合物半導体であった。近年ではペロブスカイト系材料や有機半導体材料も電流注入向けの発光材料、つまりLED用として注目を浴びつつある。一般にIII-V族化合物半導体を用いたレーザーは単結晶であることが実質的に必要条件となっている。したがって、格子定数が近い半導体結晶を積層して得ることが必須であり、基板ごとに実現可能な発振波長が決まってしまうというのが常識であった。ところが、ペロブスカイト系材料や有機半導体材料はそういった制約がIII-V族半導体ほど厳密ではなく、複数の発光材料を単一の基板に積層したり、配列したりといったことが原理的には容易である。特に有機半導体を用いたLEDは盛んに研究され、近年ではディスプレイをはじめ広く実用化されている。そのレーザー化となると長い間夢物語であったが、2018年に電流注入によるレーザー発振が報告された¹⁰⁾。LEDのときそうであったように、電流注入型のレーザーでも有機材料を用いたものがひとつの研究分野として立ち上がっていくかもしれない。

おわりに

シリコンウェハは300mmが主流であり、今後は450mmへと拡大するといわれている。にもかかわらず、半導体レーザーのビーム幅は数 μm からmmのオーダーにとどまっている。ウェハという巨大なキャンパスに、われわれ半導体レーザーの研究者は十分に大きな絵を描き切れずにいる。今後の研究の進展は、こういった未踏のサイズかつ低消費電力となるレーザーを実現する方向に向かうので

はないか。また、材料の選択肢もますます増えることが期待される。そのような中で、これまでなかったような波長、形態のレーザーが生まれゆくものと期待できる。

本稿では、半導体レーザーの過去と、現在を俯瞰し、未来についての展望を述べた。しかしながら、紙面は限られており、すべての研究分野を網羅はできない点をご容赦いただきたい。また、本稿はあくまで筆者の考え憶測を述べたものであり、もっと別の見方もあるに違いない。本誌を通じて、今後も活発な議論がなされることを願いつつ、この稿を閉じたいと思う。

今回の執筆の機会をくださいました日本光学会レーザーディスプレイ技術研究グループの黒田和男先生、ならびに山本和久先生に深く感謝申し上げます。また日ごろより種々の研究会やその運営を通してご助言くださる同グループの委員の皆様に、深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) A. Einstein: Phys. Z., **18** (1917) 121.
- 2) T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. McWhorter and H. J. Zeiger: Appl. Phys. Lett., **1** (1962) 91-

- 92.
- 3) M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, Jr. and G. Lasher: Appl. Phys. Lett., **1** (1962) 62-64.
- 4) N. Holonyak Jr. and S. F. Bevacqua: Appl. Phys. Lett., **1** (1962) 82-84.
- 5) K. Iga: Jpn. J. Appl. Phys., **57** (2018) 08PA01.
- 6) W. Heisenberg: Zeitschrift für Physik, **43** (1927) 172-198.
- 7) M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, T. Tokuda, M. Murata and G. Sasaki: Appl. Phys. Lett., **75** (1999) 316-318.
- 8) D. F. Siriani and K. D. Choquette: "Coherent Coupling of Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Arrays," *Semiconductor and Semimetals Advances in Semiconductor Lasers*, 1st ed., eds. J. J. Coleman, A. C. Bryce and C. Jagadish (Academic Press, Burlington, 2012) pp. 227-267.
- 9) A. Dikopoltsev, T. H. Harder, E. Lustig, O. A. Egorov, J. Beierlein, A. Wolf, Y. Lumer, M. Emmerling, C. Schneider, S. Höfling, M. Segev and S. Klembt: Science, **373** (2021) 1514-1517.
- 10) A. S. D. Sandanayaka, T. Matsushima, F. Bencheikh, S. Terakawa, W. J. Potscavage, C. Qin, T. Fujihawa, K. Goushi, J.-C. Ribierre and C. Adachi: Appl. Phys. Express, **12** (2019) 061010.
- 11) T. Hamaguchi, Y. Hoshina, K. Hayashi, M. Tanaka, M. Ito, M. Ohara, T. Jyokawa, N. Kobayashi, H. Watanabe, M. Yokozeki, R. Koda and K. Yanashima: Appl. Phys. Express, **13** (2020) 041002.