

高屈折率差サブ波長回折格子を用いた  
シリコン基板上新機能面発光半導体レーザに関する研究

常深 義博

2014年3月

奈良先端科学技術大学院大学  
物質創成科学研究科 超高速フォトニクス研究室

河口 仁司 教授

# 目次

第1章 序論	1
1-1 研究の背景	1
1-2 研究目的	3
1-3 本論文の構成	3
1-4 参考文献	4
第2章 シリコン基板上 HCG-VCSEL 構造とその作製・設計手法	6
2-1 はじめに	6
2-2 シリコン基板上 HCG-VCSEL	6
2-3 高屈折率差サブ波長回折格子	8
2-3-1 導波モード共鳴	8
2-3-2 反射率の偏光特性	9
2-3-3 作製方法	12
2-4 異種材料接着技術	13
2-4-1 ウェハ直接ボンディング	13
2-4-2 BCB ボンディング	14
2-5 有限差分時間領域法	15
2-6 まとめ	16
2-7 参考文献	16
第3章 光導波路結合型 HCG-VCSEL における光導波路への結合効率の解析	18
3-1 はじめに	18
3-2 光導波路結合型 HCG	18
3-2-1 計算に用いた構造	18
3-2-2 反射率および結合効率の構造依存性	20
3-2-3 出力光導波路の伝搬モード	30
3-3 光導波路結合型 HCG-VCSEL	32
3-3-1 計算に用いた構造	32
3-3-2 光導波路出力の構造依存性	33
3-3-3 デバイス設計指針	38
3-4 まとめ	39
3-5 参考文献	40

第 4 章 光導波路結合型 HCG-VCSEL における出力光導波路切替の解析	41
4-1 はじめに	41
4-2 計算に用いた構造	41
4-3 光出力特性	45
4-3-1 各出力パワーの相対関係	45
4-3-2 出力光導波路の伝搬モード	48
4-4 まとめ	50
4-5 参考文献	50
第 5 章 HCG-VCSEL の設計、作製および光励起レーザ発振	51
5-1 はじめに	51
5-2 HCG-VCSEL の設計	51
5-2-1 デバイス構造	51
5-2-2 DBR ウェハ	52
5-2-3 活性層ウェハ	54
5-2-4 偏光無依存 HCG の反射率特性	58
5-2-5 BCB 膜厚と共振波長	60
5-3 BCB 埋め込み偏光無依存 HCG の反射率	61
5-3-1 BCB-HCG の反射率特性	61
5-3-2 BCB-HCG の反射率測定	63
5-4 HCG-VCSEL の作製プロセス	67
5-5 光励起レーザ発振	78
5-5-1 光励起測定系	78
5-5-2 HCG-VCSEL の光励起レーザ発振	79
5-5-3 室温発振に向けた HCG 構造の検討	83
5-5-4 室温での光励起レーザ発振	85
5-6 まとめ	90
5-7 参考文献	91
第 6 章 光導波路結合型 HCG-VCSEL に向けたデバイス構造および作製プロセスの検討	92
6-1 はじめに	92
6-2 光導波路結合型 HCG-VCSEL 構造	92
6-3 要素技術の確立	93
6-3-1 グレーティングカプラを用いた光導波路出力の取出し	93

6-3-2 BCB ボンディング時の位置ずれの低減 .....	95
6-3-3 グレーティングカプラ露出 .....	97
6-4 今後の展望 .....	97
6-5 まとめ .....	98
6-5 参考文献 .....	98
第7章 結論 .....	99
研究業績 .....	101
謝辞 .....	104

# 第 1 章 序論

## 1-1 研究の背景

各家庭にブロードバンド光回線が普及し、超高速光通信技術の研究開発が精力的に進められている。現在の通信ネットワークにおいて、光を使用しているのは、光ファイバを用いた信号の伝送のみであり、通信の中継点では、光を一度電気信号に変換して信号処理を行い、再度光に変換して伝送を行っている。電子回路は 100 Gbit/s 辺りに速度限界があると予想され、より高速な通信ネットワークを実現するためには、光から電気への変換を行わず、光を光のまま信号処理する技術が必要とされている。その一つの方法として面発光半導体レーザ (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: VCSEL) [1-3]を用いた全光信号処理が提案されている[4]。

VCSEL は端面出射型レーザと比較して、活性層の体積が小さいため発振閾値電流を極めて小さくできることや、光の共振方向が基板に対して垂直であるため同一基板上に 2 次元アレイ集積できるなどの利点を持つ。また、光導波路の断面形状を正方形に加工した VCSEL は、辺に沿った 2 つの直交する発振偏光モード間で双安定性を示す[5]。この偏光双安定 VCSEL に光パルスを外部から入射すると、入射パルスと同じ偏光方向の発振偏光モードに切り替わる。そして、入射パルスがなくなった後でもその発振偏光モードを保持するため、光バッファメモリとして機能する[6]。しかし、現在の偏光双安定 VCSEL を用いた光信号処理は、空間光学系を介して行われるため、光バッファメモリへの応用においては、デバイスサイズが非常に大きくなるという課題がある。

近年、厚さ数百ナノメートルで分布ブラッグ反射鏡 (Distributed Bragg Reflector: DBR) に匹敵する広帯域な高反射率特性を示す高屈折率差サブ波長回折格子 (High-index-Contrast subwavelength Grating: HCG) [7, 8]が大きな注目を集めており、VCSEL の反射鏡にも適用されている[9-12]。一般的な HCG の格子はストライプ状であり、入射偏光方向が格子に対して平行あるいは直交なときのみ広帯域な高反射率特性を示す[13, 14]。この反射率の強い入射偏光方向依存性を利用した VCSEL の発振偏光方向の安定化[15]や、反射率の入射光角度依存性を利用した VCSEL の大口径・大出力化[15, 16]に関する研究など、その応用分野は多岐に渡る。また、SOI (silicon-on-insulator) 基板上に HCG および HCG に連続した光導波路を形成し、HCG を片側反射鏡とした光導波路結合型 HCG-VCSEL が提案されている[17]。この

光導波路結合型 HCG-VCSEL は、基板内に光が共振する HCG の特徴(導波モード共鳴[18])を利用して、VCSEL のレーザ出力をシリコン基板内の光導波路に結合・伝搬することができるため、光インターコネクタなどへの応用が期待されているシリコンフォトニクスにおける光源として用いることができる。この光導波路結合型 HCG-VCSEL に着目し、偏光双安定 VCSEL に適用することを考えた。偏光双安定 VCSEL の反射鏡に HCG を適用する場合、偏光方向によって反射率が変化しない偏光無依存な反射率特性が求められる。そこで我々は、偏光無依存 HCG として、 $90^\circ$ の回転対称性を持つ井桁状の周期構造を提案した[19]。さらに、図 1-1 に示すように偏光無依存 HCG を片側反射鏡として使い、井桁に沿った 2 方向に光導波路を配置した光導波路結合型 HCG-VCSEL を考案した[20]。

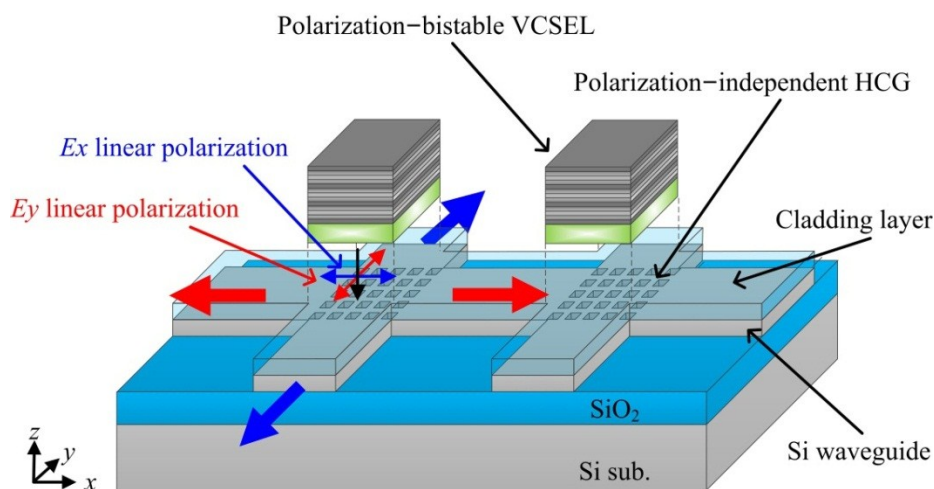


図 1-1 光導波路結合型 HCG-VCSEL の概念図

図 1-1 では偏光双安定 VCSEL が、ある直線偏光 ( $E_x$  または  $E_y$ ) で発振している場合、上下あるいは左右の光導波路へ光が結合・伝搬する。そして、VCSEL の発振偏光方向が直交する偏光方向に切り替わると、出力される光導波路も切り替わると考えた。この機能を実現できれば、これまで用いてきた空間光学系ではなく、光導波路を介して各偏光双安定 VCSEL を結合することができ、光バッファメモリなどへ用いられる偏光双安定 VCSEL アレイを格段に小型化できるとともに、シリコンフォトニクスに向けた新しい光信号処理デバイスとしての応用も期待できる。これまでに光導波路結合型 HCG-VCSEL のレーザ発振のみならず偏光無依存 HCG を片側反射鏡とした VCSEL の報告はない。したがって、偏光双安定特性を有する光導波路結合型 HCG-VCSEL の実現に向けて、その光出力特性の解明やデバイス作製プロセスの確立、さらには VCSEL のレーザ発振が実現できれば、非常に幅広い分野へ応用可能な知見が得られると考えられる。

## 1-2 研究目的

本研究では、出力光導波路が切り替えられ、Si 基板上の新しい光信号処理デバイスとして期待できる光導波路結合型 HCG-VCSEL の実現に向けた知見を得ることを目的とする。

そのために、まず VCSEL 構造を含まない光導波路結合型 HCG の反射率、光導波路への結合効率および伝搬モードなどの構造依存性を 2 次元 FDTD 法により解析し、基本的な諸特性を明らかにする。また、解析対象とする構造を VCSEL を含んだ光導波路結合型 HCG-VCSEL に拡張し、光導波路出力の構造依存性の解析で得られた結果を基にデバイス設計の指針を得る。次に、3 次元 FDTD 法による数値解析を用いて、光導波路結合型 HCG-VCSEL の発振偏光方向による出力光導波路の切り替え機能を検討する。そして、光導波路結合型 HCG-VCSEL の作製に向け、デバイス構造の設計と作製プロセスの検討を行うとともに、最も重要な構成要素である偏光無依存 HCG を作製し、反射率特性を測定する。さらに、HCG-VCSEL 作製プロセスにおける各要素技術を確立し、作製した HCG-VCSEL の光励起によるレーザ発振を目指す。

## 1-3 本論文の構成

本論文は 7 つの章で構成されている。

第 2 章では本研究の基礎となる HCG の原理、特徴および作製方法について説明する。また、HCG-VCSEL 作製において必須となる異種材料接着技術ならびに、本論文の数値解析に用いた有限差分時間領域 (FDTD) 法について説明する。

第 3 章では 2 次元 FDTD 法を用いて光導波路結合型 HCG の反射率および光導波路への結合効率の構造依存性を述べるとともに、光導波路結合型 HCG-VCSEL の共振器特性の構造依存性について述べる。

第 4 章では直交した光導波路を結合した偏光無依存 HCG を片側反射鏡とする VCSEL の光導波路出力特性を 3 次元 FDTD 法により解析し、VCSEL の発振偏光方向によって出力する光導波路を切り替えられることについて述べる。

第 5 章では光導波路結合型 HCG-VCSEL の実現に向けて、デバイス構造の検討および設計について説明し、作製した HCG-VCSEL が光励起による室温でのレーザ発振を示したことについて述べる。

第 6 章では光導波路結合型 HCG-VCSEL の実現に向けたデバイス構造の検討およびデバイス作製プロセスについて述べる。

最後に第 7 章において本論文の結論を述べる。

#### 1-4 参考文献

- [1] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **18**, 2329 (1979).
- [2] K. Iga, F. Koyama, and S. Kinoshita, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-24**, 1845 (1988).
- [3] A. Kasukawa, *IEEE Photon. J.* **4**, 642 (2012).
- [4] H. Kawaguchi, T. Mori, Y. Sato, and Y. Yamayoshi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 894 (2006).
- [5] H. Kawaguchi, *Opto-Electron. Rev.* **17**, 265 (2009).
- [6] T. Katayama, T. Ooi, and H. Kawaguchi, *IEEE J. Quantum Electron.* **45**, 1495 (2009).
- [8] C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huang, Y. deng, A. R. Neureuther, and C. J. Chang-Hasnain, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 518 (2004).
- [8] C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huand, L. Chen, C. J. Chang-Hasnain, and Y. Suzuki, *IEEE Photon. Technol. Lett* **16**, 1676 (2004).
- [9] M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, *Nat. Photonics* **1**, 119 (2007).
- [10] C. Sciancalepor, B. B. Bakir, X. Letartre, J. Harduin, N. Olivier, C. Seassal, J. M. Fedeli, and P. Viktorovitch, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24**, 455 (2012).
- [11] C. Chase, Y. Rao, W. Hofmann, and C. J. Chang-Hasnain, *Opt. Express* **18**, 15461 (2010).
- [12] S. Boutami, B. Benbakir, J. L. Leclercq, and P. Viktrovitch, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 071105 (2007).
- [13] Y. Zhou, M. C. Y. Huang, and C. J. Chang-Hasnain, *Opt. Express* **16**, 14221 (2008)
- [14] Y. Rao, W. Yang, C. Chase, M. C. Y. Huang, D. P. Worland, S. Khaleghi, M. R. Chitgarha, M. Ziyadi, A. E. Willner, and C. J. Chang-Hasnain, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19**, 1701311 (2013).
- [15] W. Hofmann, C. Chase, M. Müller, Y. Rao, C. Grasse, G. Böhm, M. C. Amann, and C. J. Chang-Hasnain, *IEEE Photon. J.* **2**, 415 (2010).
- [16] F. Koyama, *Proc. of SPIE* **8270**, 827005 (2012).



- [17] I. S. Chung and J. Mørk, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 151113 (2010).
- [18] R. Magnusson and M. S. Saremi, *Opt. Express* **16**, 3456 (2008).
- [19] K. Ikeda, K. Takeuchi, K. Takayose, I. S. Chung, J. Mørk, and H. Kawaguchi, *Appl. Opt.* **52**, 1049 (2013).
- [20] 河口 仁司, 片山 健夫, 池田 和浩, 特願 2012-183539.

## 第2章 シリコン基板上 HCG-VCSEL 構造とその作製・設計手法

### 2-1 はじめに

本章では、本研究で解析、設計、作製するシリコン基板上 1.55  $\mu\text{m}$  帯 HCG-VCSEL の構造について述べる。また、それを実現するための要素技術である HCG および異種材料接着技術について説明する。また、本研究の数値解析に使用した有限差分時間領域 (FDTD) 法について説明する。

### 2-2 シリコン基板上 HCG-VCSEL

VCSEL は、半導体基板に対して垂直方向にレーザ共振器を構成することで、レーザ出力を表面から取り出せるようにしたレーザである。半導体基板上に DBR、活性層、DBR の順で結晶成長され、上下の DBR で共振器を形成している。DBR は屈折率が異なる半導体を交互に積層した周期構造であり、ブラッグ条件によりその周期の 2 倍の波長近傍で高反射率を示す。活性層で発生した光は、DBR で反射を繰り返しながら誘導放出によって増幅され、レーザ発振に至る。VCSEL では、端面出射型レーザと異なり、共振器が結晶成長の段階で作製されるため、加工せずにレーザ発振測定を行うことができるなどの利点を持つ。

半導体からなる DBR は各層の屈折率差が GaAs 系の場合 0.6 程度、InP 系の場合 0.3 程度と小さく、各層での反射率が低いため、レーザ発振に必要な高い反射率 (99% 程度) を得るためには 25–40 ペアの層数が必要になる。InP 基板上に成長できる 1.55  $\mu\text{m}$  帯 VCSEL の場合、基板に格子整合する InP 系の DBR は、必要となるペア数が多く、またスプリットオフ帯と重い正孔帯間の遷移による価電子帯間吸収 [1] が強く、特に顕著になる p-DBR ではペア数を増やしても十分な反射率を得ることが困難である [2]。屈折率差が比較的大きく、熱伝導率も高い GaAs 系 DBR を 1.55  $\mu\text{m}$  帯 VCSEL に用いることは、InP と GaAs で結晶の格子不整合が約 3.7% であるため直接成長することは難しいが [2]、別の基板上に成長した上で直接ボンディングする手法が提案、実証されている。

一方、単層膜で広帯域な高反射率が得られる HCG が提案されている [3]。波長 850 nm において 40 ペア程度の GaAs/AlGaAs DBR の厚さが 5  $\mu\text{m}$  程度であるのに対して、同じ波長範囲で同様の高反射率帯を有する HCG の厚さは 235 nm である [4]。このよう

に非常に薄い反射鏡として機能する HCG は、2007 年に Huang らによって VCSEL の片側反射鏡として組み込まれ (HCG-VCSEL)、室温での電流注入発振が実現された [4]。この構造では、DBR、活性層、犠牲層、AlGaAs 単層の順に一括成長し、AlGaAs 層に対して、電子線リソグラフィとドライエッチングにより HCG を形成し、ウェットエッチングによって犠牲層を除去することで HCG のエアブリッジ構造とした。2012 年には Sciancalepore らによって VCSEL の両側反射鏡を HCG とした HCG-VCSEL の光励起発振が報告された [5]。また、2010 年には Chung らにより、光導波路を結合した HCG を SOI 基板上的 Si 層に形成し、片側反射鏡とする光導波路結合型 HCG-VCSEL が提案され、VCSEL の光出力を基板面内の光導波路に結合できることが数値解析によって示された [6]。

以上の研究を背景に、本研究では Si 基板上 1.55  $\mu\text{m}$  帯 HCG-VCSEL の作製を目指す。Chung らは、ストライプ状の HCG に連続する 1 軸方向の光導波路を結合した構造を検討した。一方、本研究では、図 1-1 に示したような井桁状の偏光無依存 HCG に複数の光導波路を結合した Si 基板上の偏光双安定デバイスを対象としており、図 2-1 に示すように、InP 系活性層に AlGaAs DBR、および SOI 基板上 HCG を両側からボンディングした構造を検討する。

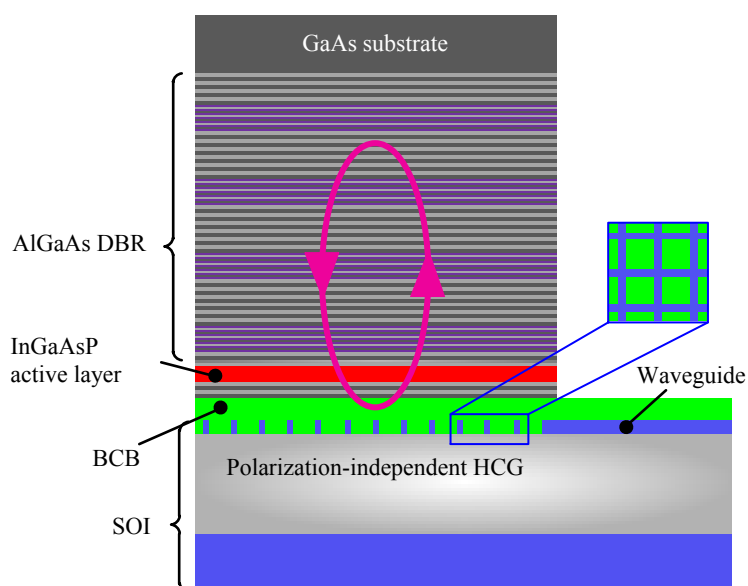


図 2-1 シリコン基板上光導波路結合型 HCG-VCSEL 構造

## 2-3 高屈折率差サブ波長回折格子

HCG とは、屈折率の高い材料の周囲を屈折率の低い材料で囲われた単層の周期構造から成り、DBR に匹敵する反射率とそれを上回る反射率帯域を有する構造である。[4]。ここでは、HCG が広帯域な高反射率を示す原理である導波モード共鳴について述べた後、反射率の偏光依存性について述べる。最後に、本研究における HCG の作製方法について説明する。

### 2-3-1 導波モード共鳴

HCG が高反射率を示す理由は以下で述べる導波モード共鳴によって説明される[7-9]。図 2-2(a)に示すような、導波モード共鳴格子と呼ばれる格子層をコア ( $n_1$ )、上下の低屈折率層をクラッド ( $n_2, n_3$ )としたスラブ導波路 ( $n_1 > n_2, n_3$ )を考える。格子の周期  $A$  は格子層内に回折波が生じるものの入射空間および基板側へは回折波が生じないサブ波長程度の短さに設計される。格子層に回折された入射波は上下の低屈折率層との界面で全反射しながら格子層を伝搬することになるが、光が実際に伝搬するためにはスラブ導波路の伝搬条件を満足しなければならない。この条件は位相整合条件と呼ばれ、入射光の波長  $\lambda$  と格子の周期  $A$  を用いて、

$$\frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta + m \frac{2\pi}{A} = \beta s \quad (2-1)$$

で表される。 $\theta$  は入射光の角度、 $m$  は回折次数を表す整数である。 $\beta s$  はスラブ導波路の伝搬定数であり  $\lambda$  に比例する。この位相整合条件を満足する場合、回折波は格子層内を伝搬する。このモードは、格子の影響によって格子層外部への回折波を伴うので放射モードと呼ばれる。

図 2-2(b)では赤線で TE の放射モードに対する 2 次のストップバンド付近の分散関係を示している。TE<sub>0</sub> は基本モード、TE<sub>1</sub> は 1 次モードの分散関係を示す。 $\beta$  は放射モードの伝搬定数、 $k_0$  は真空中の波数、 $K = 2\pi/A$ 、 $R$  は反射率を示す。放射モードがブラッグの回折条件を満たす共鳴波長付近では、格子層の上下方向に回折波が発生する。基板側へ放射された回折波は入射光と位相が反転するため、干渉によって透過光はなくなる(図 2-2(b)のバンド端の高エネルギー側に相当)。入射側に放射された回折波は同位相となり、反射光となる(図 2-2(b)のバンド端の低エネルギー側に相当)。したがって、共鳴波長での反射率は理論上 100%になる。

HCG では、格子と周囲の屈折率差が大きく、入射波が複数の放射モード(例えば

TE<sub>0</sub> と TE<sub>1</sub>)を励起するように構造が設計されており、それらの共鳴波長が寄与して高反射率帯域が広がる。これについては 5-3 にて計算結果とともに議論する。

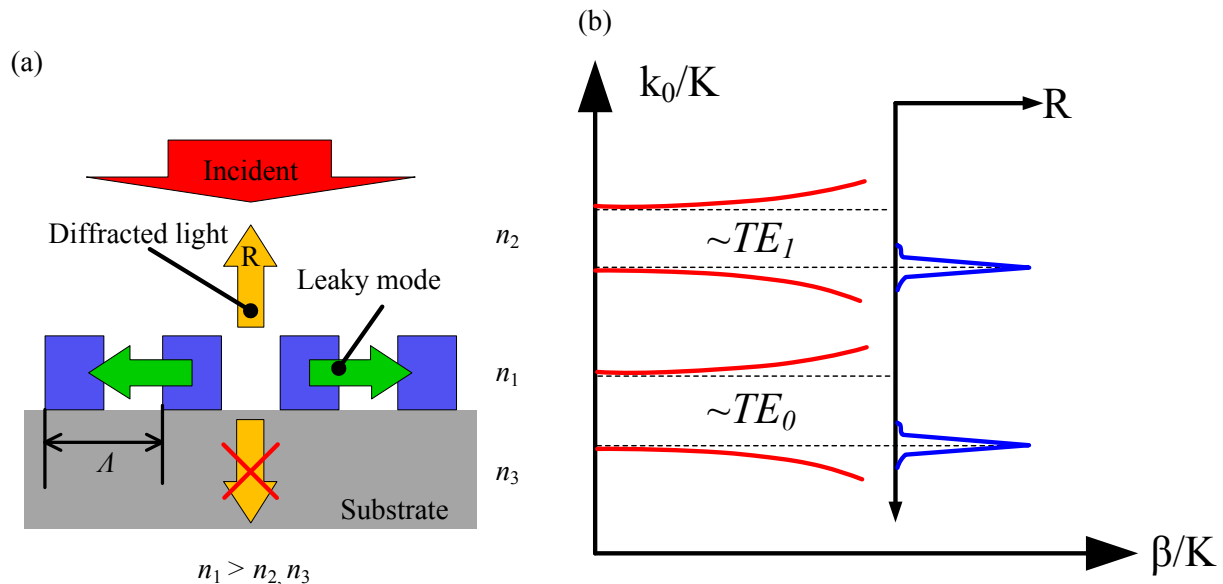


図 2-2 (a)導波モード共鳴格子の構造、(b)放射モードの分散関係[8]

### 2-3-2 反射率の偏光特性

一般的な HCG はストライプ状の格子の周期構造から成り、入射偏光方向に対する反射率特性の違いから 2 種類に大別される。一つは、格子に平行な偏光方向に広帯域、高反射率を示す Transverse Electric-HCG (TE-HCG)、もう一つは、直交した偏光方向に広帯域、高反射率を示す Transverse Magnetic-HCG (TM-HCG) である[10、11]。両者の最適な構造は表 2-1 に示すように大きく異なる。図 2-3(a)には Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>As の格子の周囲が空気である HCG 構造 (パラメータ: 格子の周期  $A$ 、幅  $W$ 、厚さ  $T$ ) を示している。E<sub>y</sub>、H<sub>x</sub> (TE) および E<sub>y</sub>、H<sub>x</sub> (TM) 成分からなる入射偏光に対して、波長 850 nm 付近に高反射率を示すように構造を最適化したときの反射率スペクトルを図 2-3(b)、(c)に示す。TE-HCG には格子に平行な偏光、TM-HCG には垂直な偏光を入射した場合にのみ広帯域な反射率特性を示すことがわかる。表 2-1 に示した構造パラメータを比較すると、TE-HCG では  $A$  に対する  $W$  が小さく、 $T$  が半分程度の厚さであることが特徴である。つまり、それぞれの HCG では構造が大きく異なるため、目的とする反射率特性を持つ反射鏡を比較的容易に作り分けることが可能である。

表 2-1 HCG 構造パラメータ[12]

	$A$ (nm)	$T$ (nm)	$W$ (nm)
TE-HCG	620	140	120
TM-HCG	380	235	250

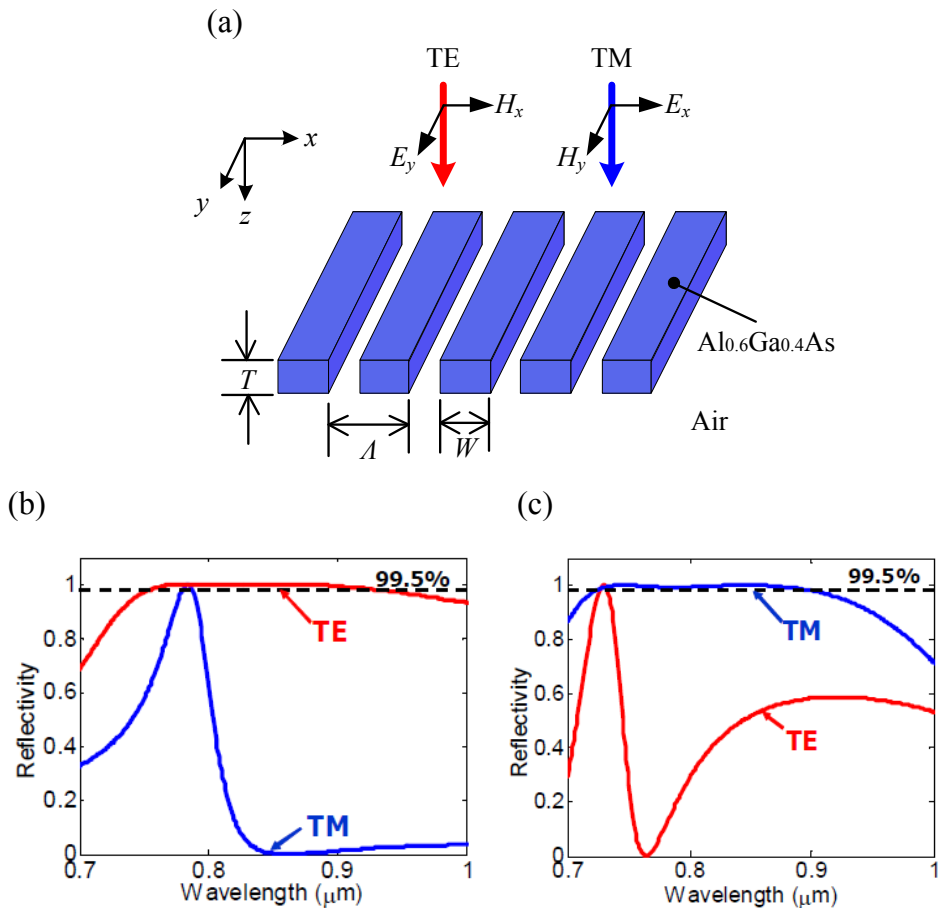


図 2-3 (a)HCG 構造例、(b)TE、(c)TM-HCG の反射率スペクトル[12]

2つの直交する発振偏光方向で双安定性を示す偏光安定 VCSEL に HCG を適用するためには、その2つの偏光方向に対して同じ反射率を持つ必要がある。図 2-4(a)に示すような井桁状の格子は  $90^\circ$  の回転対称性を持つため、格子に沿った2つの偏光方向だけではなく、偏光方向によらず同じ反射率を示す偏光無依存 HCG を実現できる。例えば、VCSEL のメサと HCG の格子の角度が回転して配置された場合、偏光無依存な反射率であれば、メサに沿った直交する偏光に対する反射率の低下は生じない。したがって、デバイス作製において厳密な角度調整が必要でないなどの利点が考

えられる。図 2-4(b)に偏光無依存 HCG の格子に沿った  $0^\circ$  偏光 ( $E_x$  偏光) および  $45^\circ$  回転した偏光 ( $E_x+E_y$  偏光) を入射したときの反射率スペクトルをそれぞれ、黒実線と赤破線で示す。よく一致した反射率スペクトルが得られ、偏光無依存な反射鏡であることがわかる。これは、 $45^\circ$  偏光を  $0^\circ$  と  $90^\circ$  の偏光成分に分解し、それぞれの成分が導波モード共鳴により反射した後、再び足し合わされて  $45^\circ$  偏光の反射光として得られるためだと考えられる。また、 $z$  軸に対して  $45^\circ$  回転した HCG 構造に  $0^\circ$  偏光 (格子に対して  $45^\circ$  回転した偏光に相当) を入射した場合の反射率スペクトルを青実線で示す。この場合も広範囲にわたってよく一致した反射率スペクトルが得られているが、 $1520$  nm 付近ではわずかに一致しない。使用した FDTD シミュレータ (FullWAVE、Synopsys 社) では、計算領域を  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸方向に沿った矩形の計算メッシュで分割し、それぞれに屈折率を割り当てることで構造を規定している。つまり、 $45^\circ$  回転した HCG 構造では三角波状の格子側面を扱うこととなる。その特殊な形状によってスペクトルの不一致が生じたと考えられる

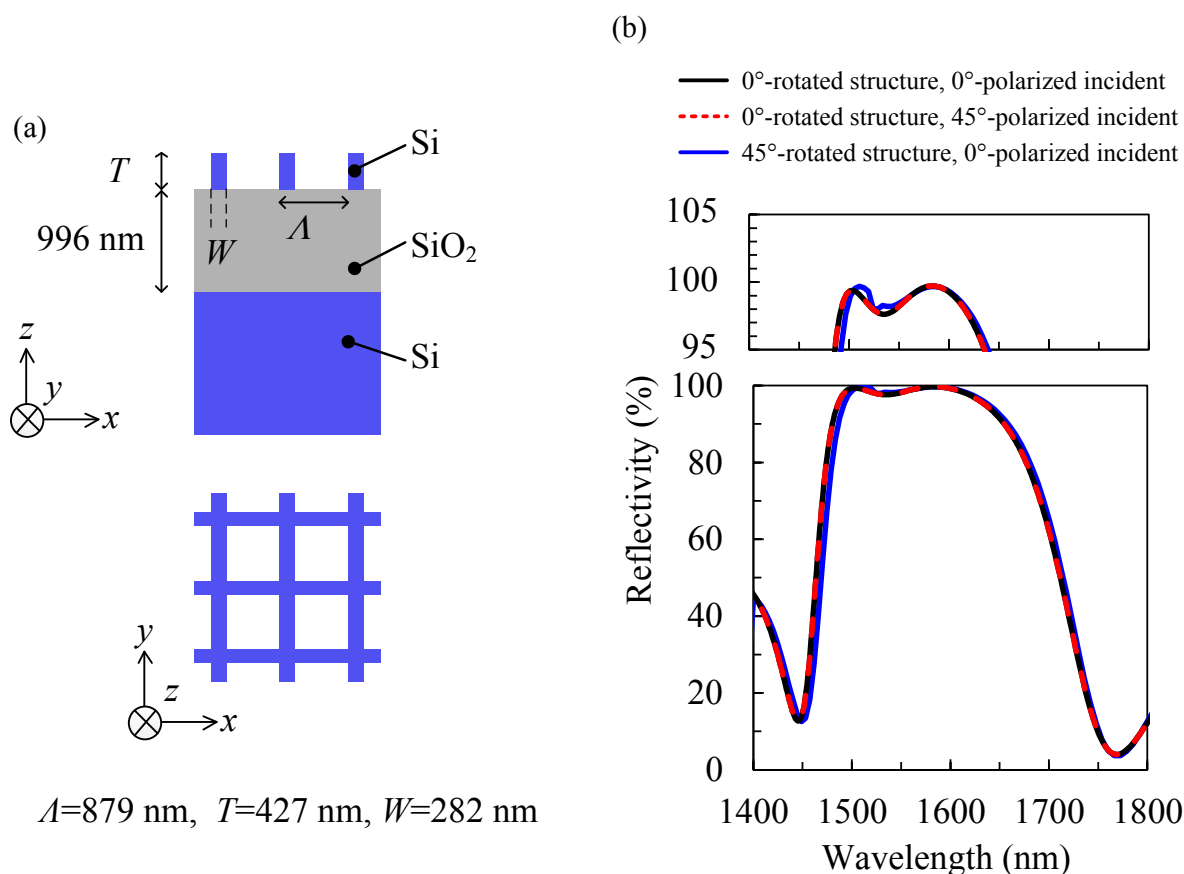


図 2-4 (a) 偏光無依存 HCG の構造例、(b)  $0^\circ$  偏光 ( $E_x$  偏光) および  $45^\circ$  回転した偏光 ( $E_x+E_y$  偏光) の入射光に対する反射率スペクトルおよび  $z$  軸に対して  $45^\circ$  回転した構造に  $0^\circ$  偏光を入射したときの反射率スペクトル

### 2-3-3 作製方法

本研究では、電子線(EB)描画装置(ELS-7500、株式会社エリオニクス)を用いたEBレジスト(ZEP520A、日本ゼオン株式会社)のパターニングによるエッチングマスク形成と容量結合プラズマ反応性イオンエッチング(Capacitive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching: CCP-RIE)装置(RIE-10NR、サムコ株式会社)によるSiのエッチングを用いてSOI基板上の偏光無依存HCGを作製した。筆者が所属する研究室の先行研究[13]において、ネガ型のEBレジストを用いたパターニングも検討されたが、RIEにおけるSiとのエッチング選択比が小さいことが課題であった。一方、ポジ型のZEP520Aではその課題を克服でき、垂直かつ平滑なエッチングマスクを形成できる。RIEでは、 $\text{SF}_6$ と $\text{CHF}_3$ の混合ガスを使用した。主に $\text{SF}_6$ がSiのエッチング、 $\text{CHF}_3$ が格子側面の垂直性を向上させる役割を担う。RIEによる格子幅の減少を最も低減できるエッチングガスの混合比は $\text{SF}_6/\text{CHF}_3 = 5/80 \text{ sccm}$ であるため、本研究においてもこの条件を採用した。図2-5に作製された偏光無依存HCGの走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)画像を示す。

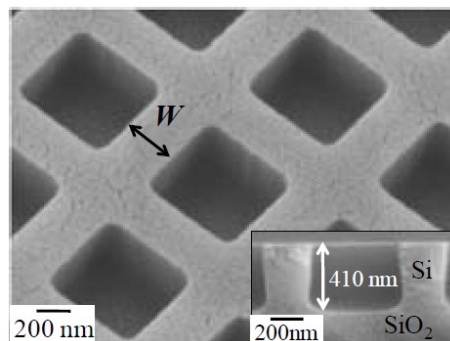


図2-5 偏光無依存HCGのSEM画像[14]



## 2-4 異種材料接着技術

本研究では、図 2-1 に示したように、InGaAsP 量子井戸 (QWs) から成る活性層の下側反射鏡には SOI 基板上の偏光無依存 HCG、上側反射鏡には AlGaAs DBR を用いて HCG-VCSEL を構成する。そこで、本研究では、活性層と DBR はウェハ直接ボンディング、活性層と偏光無依存 HCG は BCB (Benzocyclobutene) ボンディングと呼ばれる異種材料接着技術を用いて共振器を形成する、ここでは、各種接着技術の概要および特徴について述べる。

### 2-4-1 ウェハ直接ボンディング

屈折率差が比較的大きく熱伝導率が高い、加えて高 Al 組成層を選択的に酸化して電流狭窄ができる AlGaAs DBR を 1.55  $\mu\text{m}$  帯 VCSEL の反射鏡に適用する手法として、InP 基板上に成長した活性層と GaAs 基板上に成長した DBR を接着するウェハ直接ボンディングが提案、実証されている。GaAs と InP の接着は 1990 年に Liao らによって初めて行われ [15]、1991 年には Lo らによって GaAs ウェハに接着した InGaAsP/InP 端面出射型レーザが作製された [16]。また、1996 年には Margalit らによって 1.55  $\mu\text{m}$  帯 VCSEL の室温における電流注入発振が実現された [17]。

ウェハ直接ボンディングの原理は、以下の様に説明される [18]。接着前のウェハの表面処理により InP、GaAs ウェハの表面に水酸基 (OH 基) を形成する。この状態で両者を貼り合わせると OH 基同士の水素結合、および分子間力により両者が接着される。その後、水素雰囲気中で加圧、加熱することで、GaAs-O-InP 結合ができ、さらに、O 原子が水素により取り除かれ GaAs と InP ウェハが直接接着される (図 2-6)。

本研究では、まず、両基板に対してオゾンクリーニング (Model UV-1、サムコ株式会社) により、ウェハ表面の有機不純物を除去した。次に、アルカリ半導体洗浄液 (セミコクリーン 23、フルウチ化学株式会社) および希釈フッ酸 (BHF) により酸化膜を除去した後、 $\text{NH}_4\text{OH}$  により表面に OH 基を形成した。 $\text{NH}_4\text{OH}$  中にて両ウェハ表面を重ね、溶液中から取り出した後、およそ  $260 \text{ kg/cm}^2$  の荷重を加えたまま赤外線ランプ加熱装置 (QHC-P610CP、アルバック理工株式会社) に搬入し、水素および窒素の混合ガス雰囲気中で  $600^\circ\text{C}$ 、30 分間のアニーリングを行うことでウェハを接着した。

ここで、半導体を  $600^\circ\text{C}$  の高温でアニーリングすることにより As や P が基板から脱離することが懸念される。しかし、これまでにウェハ直接ボンディングを用いて作製した VCSEL のレーザ発振が数多く報告されていることから、材料脱離による劇的な結晶性

の劣化は生じないと考えられる。

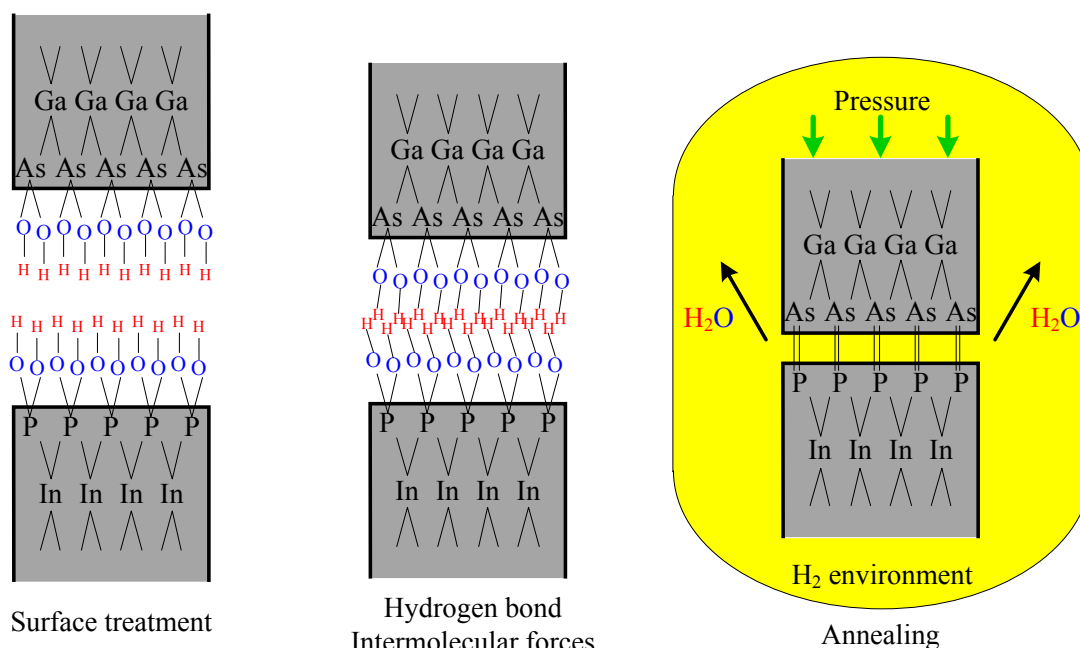


図 2-6 ウェハ直接ボンディング概念図

## 2-4-2 BCB ボンディング

2-4-1 で述べたウェハ直接ボンディングの他にも SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> ボンディングなどの接着技術が知られている[19]。しかし、これらの接着技術では、非常に平坦なウェハ表面が求められるため、化学機械研磨などによる精密な表面処理が求められる[20]。一方、ウェハ上へスピンコーティングできる材料を接着材として用いた接着方法も提案されている。その一つに、SOG (Spin-On-Glass) を用いた接着技術[21]があるが、接着する基板に微細構造が有る場合、平坦な SOG 膜が得られず、ウェハ界面に空隙ができるという欠点がある[22]。そこで、BCB (屈折率 1.55@1.55 μm [20]) を接着材としてウェハを接着する BCB ボンディングが注目を集めている[20, 22-24]。半導体レーザにおけるメサの保護やパッシベーションを目的として用いられる BCB は、同じく埋め込み材料として用いられるポリイミドよりもキュアによる収縮が少ないことや、比較的低温 (250°C) でキュアが可能などの利点がある[25, 26]。また、BCB はスピコートで基板上に成膜でき、溶液の希釈率も可変であるため、得られる膜厚の自由度は高い。そこで、本研究ではキュアプロセスのみで活性層と SOI 基板上偏光無依存 HCG を接着できる BCB ボンディングを用いた。

## 2-5 有限差分時間領域法

近年のコンピュータの急速な発展とともに有限差分時間領域 (Finite Difference Time Domain: FDTD) 法が電磁場解析の主要な解析手法として確立されつつある[27、28]。FDTD 法では解析領域全体を微小な直方体に分割し、かつ時間的にも離散化する。その直方体すべてにマクスウェルの微分方程式を適用し、逐次、解を求めている。したがって、FDTD 法では近似を使用せず、厳密にマクスウェル方程式を解くことで電磁場解析を行う。また、反射が生じる構造には適用できないビーム伝搬法とは異なり、FDTD 法では VCSEL やフォトニック結晶などの共振器構造においても、正確な電磁場解析が行えるため、本研究では FDTD 法を数値解析の手法として用いた。

本研究の電磁場解析には市販のシミュレータである FullWAVE (Synopsys 社) を用いた。FullWAVE では 2 次元および 3 次元構造を対象に数値解析が可能である。矩形や円柱などの基本的な形状だけでなく、より複雑な構造を規定でき、それらの形状や屈折率などを組み合わせることで HCG や VCSEL 構造をモデル化することができる。計算領域内の任意の場所の電磁場強度の時間的応答や空間分布を知ることができ、時間応答をフーリエ変換することで周波数応答も知ることができる。

FDTD 法では正確な解を得るために、空間領域は波長の  $1/20$  以上の刻み幅を設定する必要があるため、大きな計算領域を考える場合や、共振器などの定常状態になるまでの時間が長く必要な構造を扱う場合は、計算時間が膨大になることを考慮して計算構造の決定を行う必要がある。完全導体で囲まれていない構造を扱う場合に用いられる境界条件を吸収境界条件という。吸収境界条件の一つである完全整合層 (Perfect Matched Layer: PML) は、他の吸収境界条件と比較して、計算誤差を招く境界からの反射成分を減少できる有効な境界条件であるため、本研究における多くの数値計算で使用した。また、偏光無依存 HCG のような対称性のある構造においては、周期的境界条件 (Periodic Boundary Condition: PBC) を適用した。PBC を適用した軸方向の領域は、その軸方向に無限に繰り返された構造として扱われる。したがって、小さな計算領域で無限に広がった構造の電磁場解析が可能になるため、時間的効率が飛躍的に向上する。

## 2-6 まとめ

本章では、本研究の対象とする  $1.55\ \mu\text{m}$  帯光導波路結合型 HCG-VSCEL の構造について研究動向、着想に至った経緯を交えつつ説明した。また、その構造を実現するための要素技術である HCG、ウェハ直接ボンディングおよび BCB ボンディングの必要性ならびに原理や特徴についても述べた。最後に、本研究で使用した数値計算手法である FDTD について説明した。

## 2-7 参考文献

- [1] A. R. Adams, M. Asada, Y. Suematsu, and S. Arai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **19**, L261 (1980).
- [2] 伊賀 健一, 小山 二三夫, 「面発光レーザの基礎と応用」, 共立出版株式会社 (1999).
- [3] C. F. R. Mateus, M. C. Y. Huang, Y. deng, A. R. Neureuther, and C. J. Chang-Hasnain, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 518 (2004).
- [4] M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, *Nat. Photonics* **1**, 119 (2007).
- [5] C. Sciancalepor, B. B. Bakir, X. Letartre, J. Harduin, N. Olivier, C. Seassal, J. M. Fedeli, and P. Viktorovitch, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24**, 455 (2012).
- [6] I. S. Chung and J. Mørk, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 151113 (2010).
- [7] 河田 聡, 「ナノオプティクス・ナノフォトニクスのすべて」, フロンティア出版 (2006).
- [9] Y. Ding and R. Magnusson, *Opt. Express* **15**, 680 (2007).
- [9] R. Magnusson and M. Shokooh-Saremi, *Opt. Express* **16**, 3456 (2008).
- [10] Y. Zhou, M. C. Y. Huang, and C. J. Chang-Hasnain, *Opt. Express* **16**, 14221 (2008)
- [11] Y. Rao, W. Yang, C. Chase, M. C. Y. Huang, D. P. Worland, S. Khaleghi, M. R. Chitgarha, M. Ziyadi, A. E. Willner, and C. J. Chang-Hasnain, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19**, 1701311 (2013).
- [12] Y. Zhou, Doctor thesis, University of California, Berkeley (2008).
- [13] 高寄 健太郎, 奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 平成 24 年度修士論文
- [14] 高寄 健太郎, 池田 和浩, 片山 健夫, 河口 仁司, 第 60 回応用物理学解春

季学術講演会, 29p-B3-19, 神奈川, 2013年3月29日.

[15] Z. L. Liao and D. E. Mull, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 737 (1990).

[1+] Y. H. Lo, R. Bhat, D. M. Hwang, M. A. Koza, and T. P. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 1961 (1991).

[17] N. M. Margalit, D. I. Babic, K. Streubel, R. P. Mirin, R. L. Naone, J. E. Bowers, and E. L. Hu, *Electron. Lett.* **32**, 1675 (1996).

[18] H. Wada, Y. Ogawa, and T. Kamijo, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 738 (1993).

[19] Q. Y. Tong, G. Fountain, and P. Enquist, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 042110 (2006).

[20] G. Roelkens, D. V. Thourhout, R. Beats, *Electron. Lett.* **41**, 561 (2005).

[21] H. C. Lin, K. L. Chang, G. W. Pickrell, K. C. Hsieh, and K. Y. Cheng, *J. Vac. Sci. Technol. B* **20**, 752 (2002).

[22] J. Brouckaert, G. Roelkens, D. V. Thourhout, and R. Beats, *J. Lightwave Technol.* **25**, 1053 (2007).

[23] F. Niklaus, P. Enoksson, E. Kälvesten, and G. Stemme, *J. Micromech. Microeng.* **11**, 100 (2001).

[24] I. Christiaens, G. Roelkens, K. D. Mesel, D. V. Thourhout, and R. Beats, *J. Lightwave Technol.* **23**, 517 (2005).

[25] J. Wiedmann, M. M. Raj, K. Ebihara, K. Matsui, S. Tamura and S. Arai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 4031 (2001).

[26] [http://www.microchem.com/PDFs\\_Dow/cyclotene\\_3000\\_dry\\_etch.pdf](http://www.microchem.com/PDFs_Dow/cyclotene_3000_dry_etch.pdf)

[27] 宇野 亨, 「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」, コロナ社 (1998).

[28] 山内 潤二, 藪 哲郎, 「光導波路解析入門」, 森北出版株式会社 (2007).

## 第3章 光導波路結合型 HCG-VCSEL における光導波路への結合効率の解析

### 3-1 はじめに

光導波路結合型 HCG-VCSEL の具体的なデバイス設計のためには、出力光導波路へ結合する光パワーや伝搬モードの構造依存性を把握することが重要である。2010年に Chung らによって TM-HCG を反射鏡とした光導波路結合型 HCG-VCSEL において面直のレーザ出力を面内光導波路へ結合させる概念が提案されたが、その反射率や結合効率の構造依存性の系統的な議論はされていない[1]。

本章では、2次元 FDTD 法を用いて、まず、VCSEL 共振器がない光導波路結合型 HCG において、反射率、結合効率および出力光導波路の伝搬モードの構造依存性について述べる。次に、HCG 上に活性層および DBR を配置した光導波路結合型 HCG-VCSEL において、共振器の Q 値 (Quality factor)、閾値利得および光導波路を伝搬する光パワーの構造依存性について述べる。最後に、光導波路結合型 HCG-VCSEL の設計指針について述べる。

### 3-2 光導波路結合型 HCG

光導波路結合型 HCG-VCSEL において、HCG は VCSEL の反射鏡として、また、光導波路への光結合器として機能する必要がある。また、2-3-2で述べたようにストライプ状 HCG の反射率は強い偏光依存性を示す。そこで、まず TE および TM-HCG と光導波路のみで構成された光導波路結合型 HCG 構造において光出力特性を解析した。本節では、光導波路結合型 TE-HCG および光導波路結合型 TM-HCG をそれぞれ、TE-HCG および TM-HCG として記述する。

#### 3-2-1 計算に用いた構造

図 3-1 に本計算で扱った光導波路結合型 HCG の構造図を示す。SOI 基板の Si 層に HCG および光導波路を形成し、その上に SiO<sub>2</sub> を配置している。この SiO<sub>2</sub> 層は 3-3 で述べるように VCSEL の活性層を貼り合わせる目的で配置した。回折格子の間は空

気とした。構造パラメータは HCG の周期  $A$ 、回折格子および光導波路の厚さ  $T_G$ 、格子の幅  $W$ 、HCG 下側の  $\text{SiO}_2$  の厚さ  $T_{L1}$ 、上側の  $\text{SiO}_2$  の厚さ  $T_{L2}$  である。光源はガウス型の平面波であり、強度が  $1/e^2$  になる全幅を  $10 \mu\text{m}$  とした。光導波路始点の位置は、光源の中央からの距離  $d$  で定義している。入射光の偏光は、TE-HCG に対しては  $E_y$  および  $H_x$  成分から構成される直線偏光、TM-HCG に対しては  $E_x$  および  $H_y$  成分から構成される直線偏光とした。HCG からの反射光および光導波路に結合された光のパワーは、それぞれ Monitor R および Monitor C で観測した。Monitor R は HCG 上側の  $\text{SiO}_2$  から  $z$  方向に  $1 \mu\text{m}$  離して配置した。また、Monitor C は光導波路始点から  $x$  方向に  $5 \mu\text{m}$  離し、コア内部のパワーを観測した。ここで、反射率および結合効率は、それぞれ入射光のパワーに対する Monitor R および Monitor C でのパワーとして定義した。計算領域は PML で規定し、計算メッシュの大きさは  $10 \text{ nm}$  である。

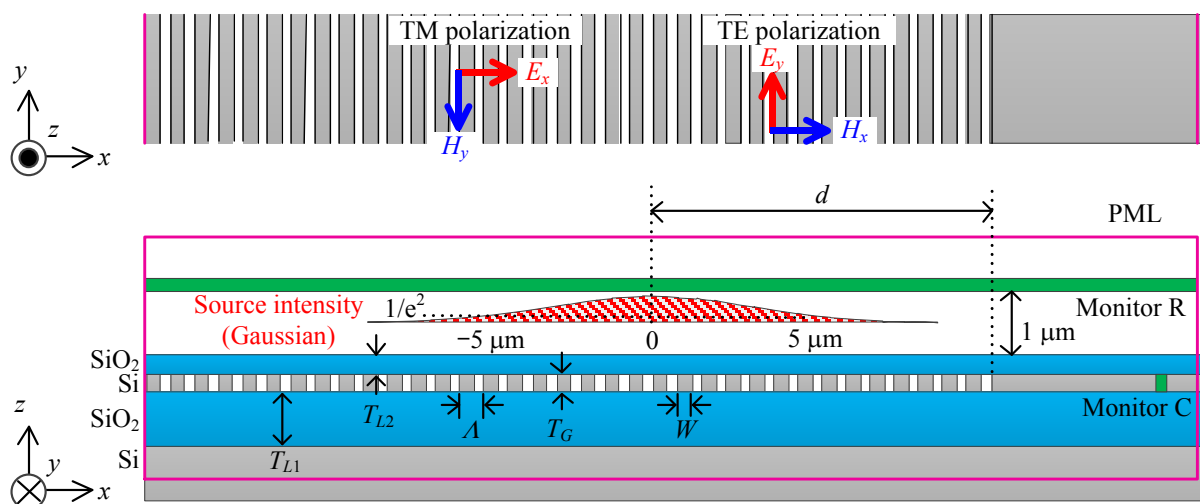


図 3-1 光導波路結合型 HCG 構造

### 3-2-2 反射率および結合効率の構造依存性

まず、光導波路の影響を受けず、HCG 本来の反射率特性を求めるために、光導波路と光源が十分に離れている  $d = 9 \mu\text{m}$  の場合について反射率と結合効率を求めた。波長  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  付近に広帯域で高反射率が得られるように最適化した HCG の構造パラメータを表 3-1 に示し、反射率スペクトル、結合効率の波長依存性を図 3-2 に示す。Si および  $\text{SiO}_2$  の屈折率は、それぞれ、3.48、1.48 [2] とした。なお、波長 1300–1800 nm 付近の屈折率分散は 0.05 程度と小さいため考慮していない。図 3-2 に示した計算結果は  $d = 9 \mu\text{m}$  の結果であるため、光導波路が光源から十分に離れており光導波路の影響をほとんど受けていない。その結果、結合効率は 0.01% 程度の小さな値である。99% 以上の反射率の帯域が TE-HCG では 130 nm、TM-HCG では 245 nm で得られ、TM-HCG の方が広がることがわかった。また、 $\lambda = 1550 \text{ nm}$  における反射率は TE-HCG では 99.88%、TM-HCG では 99.95% であり、いずれの場合も一般的な VCSEL に使用される DBR の反射率に匹敵する値である[3]。なお、同一波長における反射率と結合効率の和が 100% にならない理由は、Si 基板側への透過光成分や Monitor C を配置した領域以外の  $x$  軸方向に散乱する成分が原因だと考えられる。

表 3-1 HCG 最適構造パラメータ

	$A$ (nm)	$T_G$ (nm)	$W$ (nm)	$T_{L1}$ (nm)	$T_{L2}$ (nm)
TE-HCG	913	217	237	1200	400
TM-HCG	632	443	379	1425	500

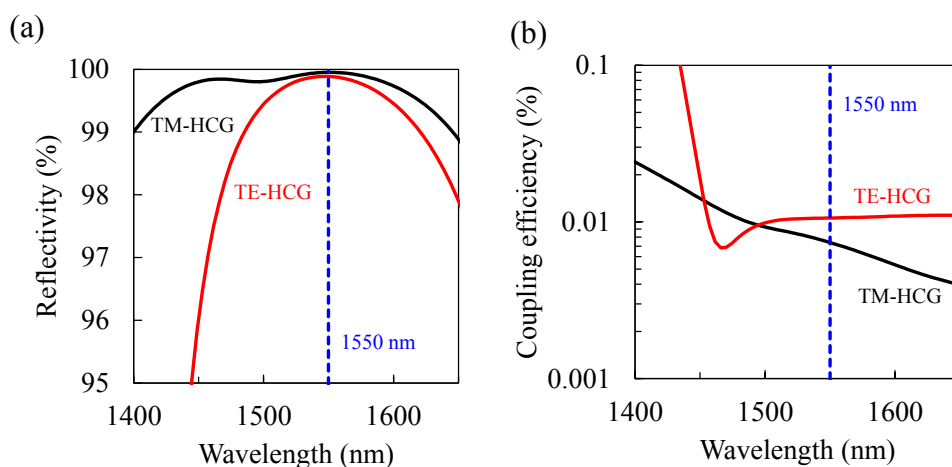


図 3-2  $d = 9 \mu\text{m}$  における TE-、TM-HCG の(a)反射率スペクトルと(b)結合効率の波長依存性



次に、光導波路結合型 HCG の反射率および結合効率の構造依存性について解析した。図 3-3 に HCG の周期  $A$  の変化に対する  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、 $d = 7, 9 \text{ }\mu\text{m}$  における反射率および結合効率の  $A$  依存性を示す。図 3-3(a)、(b) はそれぞれ TE-、TM-HCG について示している。なお、 $A$  以外のパラメータは表 3-1 の値を用いた。入射光と光導波路の重なりが大きい  $d = 7 \text{ }\mu\text{m}$  では重なりが小さい  $d = 9 \text{ }\mu\text{m}$  に比べて、反射率が低く、結合効率が大きいことがわかる。また、反射率は  $A$  が TE-HCG の場合  $913 \text{ nm}$ 、TM-HCG の場合  $632 \text{ nm}$  から離れるにしたがって、スペクトルの形状が変化するため、 $\lambda = 1550 \text{ nm}$  では反射率が低下する。その変化量は  $A \pm 20 \text{ nm}$  の変化に対して、TE-HCG では  $0.5\%$ 、TM-HCG では  $1\%$  程度である。したがって、反射率変化の  $A$  依存性は TM-HCG の方が大きい、つまり、作製許容誤差の範囲は TE-HCG の方が広いといえる。これは、最適な  $A$  は表 3-1 に示すように TM-HCG の方が小さいため、両構造に対する同一の  $A$  の変化量は、TM-HCG では相対的に大きくなるためだと考えられる。一方、 $A \pm 20 \text{ nm}$  の変化に対する結合効率の変化量は、 $d = 7, 9 \text{ }\mu\text{m}$  ではそれぞれ、 $0.1, 0.01\%$  程度であり、相対的な変化量は  $20\%$  程度である。これらの結果より、 $A$  の変化は反射率の変化には大きく寄与するが、結合効率の増減にはほとんど寄与しないといえる。

図 3-3(c)、(d) にそれぞれ、 $d = 9 \text{ }\mu\text{m}$  の場合の TE および TM-HCG における反射率スペクトルの  $A$  依存性を示す。図中の白破線は表 3-1 に示した最適値を示しており、図 3-2(a) に相当する。TE-HCG の場合、 $A$  の増加にともない、高反射率の帯域幅をおおむね維持したまま、中心波長が長波長側へと推移する。一方、TM-HCG の場合、 $A$  が  $632 \text{ nm}$  よりも大きくなると、高反射率帯域が短波および長波側に分岐し、中心にディップが現れる。TM-HCG では最適構造とした反射率スペクトルは 2 つの高反射率帯域が寄与して広帯域な特性を示していると考えられる。

図 3-4 から図 3-6 に TE および TM-HCG における反射率、結合効率および反射率スペクトルの  $T_G$ 、 $W$ 、 $T_{L1}$  依存性を示す。いずれのパラメータが変化しても反射率は数%程度変化するが、結合効率はほとんど変化しない。また、いずれの構造パラメータにおいても、構造の  $5\%$  程度以内の作製誤差が生じても反射率特性には大きな影響を与えないことがわかる。

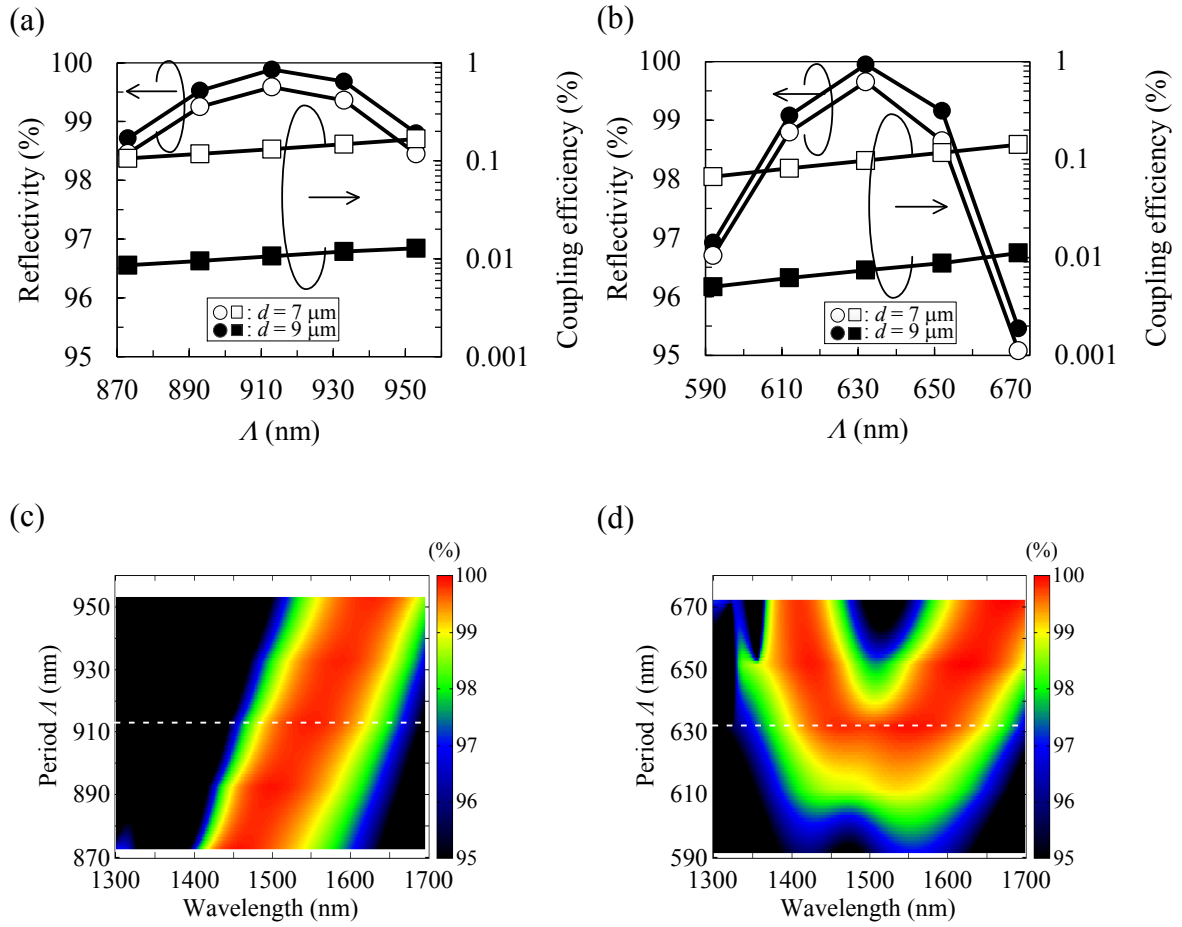


図 3-3  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、 $d = 7, 9 \mu\text{m}$  における反射率および結合効率の  $A$  依存性、(a)TE-HCG、(b)TM-HCG および  $d = 9 \mu\text{m}$  反射率スペクトルの  $A$  依存性、(c)TE-HCG、(d)TM-HCG

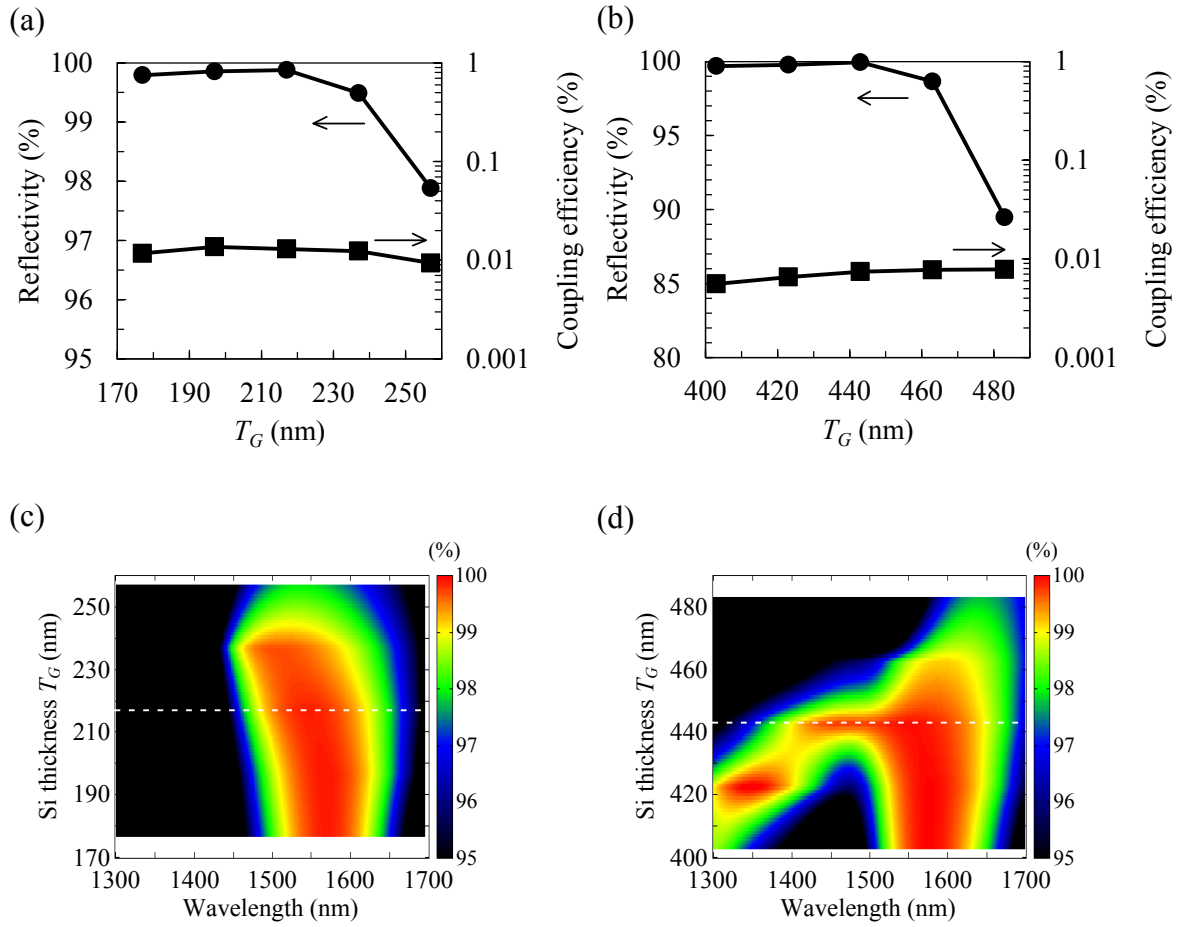


図 3-4  $\lambda = 1550$  nm、 $d = 9 \mu\text{m}$  における反射率および結合効率の  $T_G$  依存性、(a)TE-HCG、(b)TM-HCG および反射率スペクトルの  $T_G$  依存性、(c)TE-HCG、(d)TM-HCG

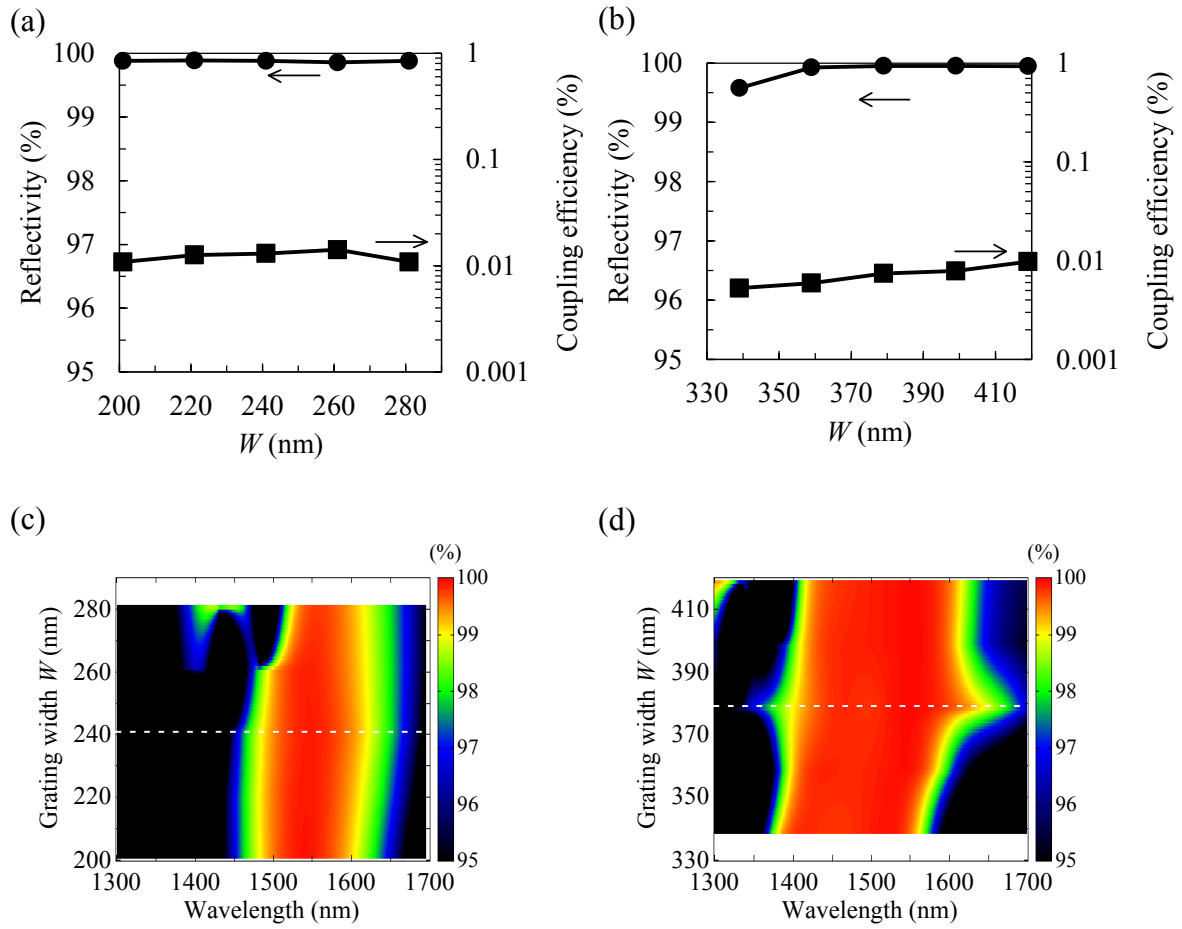


図 3-5  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 、 $d = 9 \mu\text{m}$  における反射率および結合効率の  $W$  依存性、(a)TE-HCG、(b)TM-HCG および反射率スペクトルの  $W$  依存性、(c)TE-HCG、(d)TM-HCG

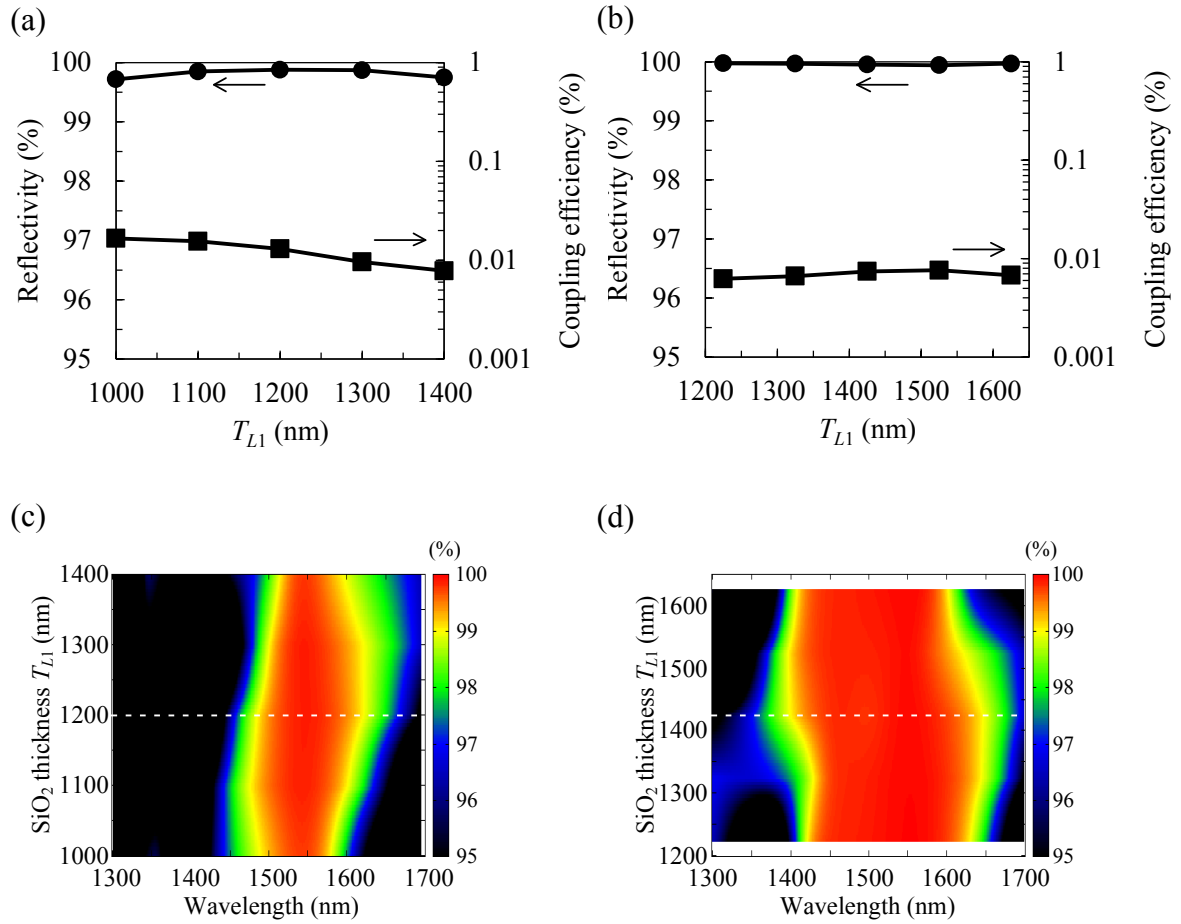


図 3-6  $\lambda = 1550$  nm、 $d = 9$   $\mu$ m における反射率および結合効率の  $T_{L1}$  依存性、(a)TE-HCG、(b)TM-HCG および反射率スペクトルの  $T_{L1}$  依存性、(c)TE-HCG、(d)TM-HCG

最後に、反射率および結合効率の  $d$  依存性について解析した。なお、 $d$  は光導波路始点の位置と光源の中央からの距離である。 $d$  が小さくなるにつれて入射光と光導波路の重なりが大きくなる、つまり、光導波路の影響が強くなることに相当する。

図 3-7 に  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  における反射率、結合効率および光導波路始点における入射光強度の  $d$  依存性を示す。なお、図 3-7(a) は TE-HCG、(b) は TM-HCG について示している。また、入射光強度は  $d = 0 \text{ }\mu\text{m}$  の場合を 1 として規格化しており、 $d = 5 \text{ }\mu\text{m}$  の結合効率と重なるように表示している。HCG 構造パラメータは表 3-1 に示した値を用いた。TE および TM-HCG の両構造において、 $d$  の減少にともなって反射率は減少し、結合効率は上昇する。これは、入射光と光導波路の重なりが大きくなるためである。図 3-3 では  $d$  の増減にともなって反射率が 1% 程度低下しても結合効率は 0.01% 程度しか得られなかった。しかし、図 3-7 の  $d = 6 \text{ }\mu\text{m}$  では 1% 程度の反射率の低下に対して、0.3% 程度の結合効率を得られる。したがって、光導波路始点における光強度が結合効率の増減に最も影響を与えることがわかった。結合効率と光導波路始点における光強度が良く一致していることから、結合効率は光導波路始点における光強度に比例して増減することを示している。

ここで、 $d = 5 \text{ }\mu\text{m}$  における反射率と結合効率を TE および TM-HCG の両構造で比較すると、いずれも TE-HCG の方が大きい。そこで、波長  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  における透過率を求めると、TE-HCG では 1.5%、TM-HCG では 1.9% であった。つまり、TM-HCG の方が反射および光導波路への結合に寄与しない透過成分(損失)が大きいといえる。

図 3-7 において、反射率の大幅な減少を抑えつつ、比較的大きな結合効率を得られる光源の位置としては  $d = 7 \text{ }\mu\text{m}$  が適していると考えられる。そこで、 $d = 7 \text{ }\mu\text{m}$  における光導波路結合型 HCG のフィールド分布について解析した。図 3-8(a) は TE-HCG の  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  における  $|E_y|^2$  分布である。(b) は(a)中の白矢印で示した Si 層中央の  $E_y$  分布を実線で、入射光の  $E_y$  分布を破線で示している。(c) は(b)の HCG と光導波路の結合部の拡大図である。図 3-8(a)より、光導波路へ光が伝搬していること、ならびに HCG と光導波路の結合部付近で光が Si 基板側へ透過していることがわかる。図 3-8(b)より、HCG 内の  $E_y$  分布の包絡線と入射光  $E_y$  分布がよく一致していることがわかる。これは、入射した光は HCG 内ではほとんど広がらないことを示している。図 3-8(c)より、光導波路を伝搬する振幅は、光導波路始点付近の振幅におおむね一致している。これは、光導波路への結合効率は光導波路始点における入射光強度に比例することを示しており、図 3-7 で述べた結果とよく一致する。図 3-9(a) は TM-HCG の  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  における  $|H_y|^2$  分布である。(b) は(a)中の白矢印で示した Si 層中央の  $H_y$  分布を実線で、入射光の  $H_y$  分布を破線で示している。(c) は(b)の HCG と光導波路の結合部の拡大図で

ある。TM-HCG においても、TE-HCG と同様に入射光は HCG 内で広がらず、結合効率は光導波路始点における入射光強度に比例することがわかった。

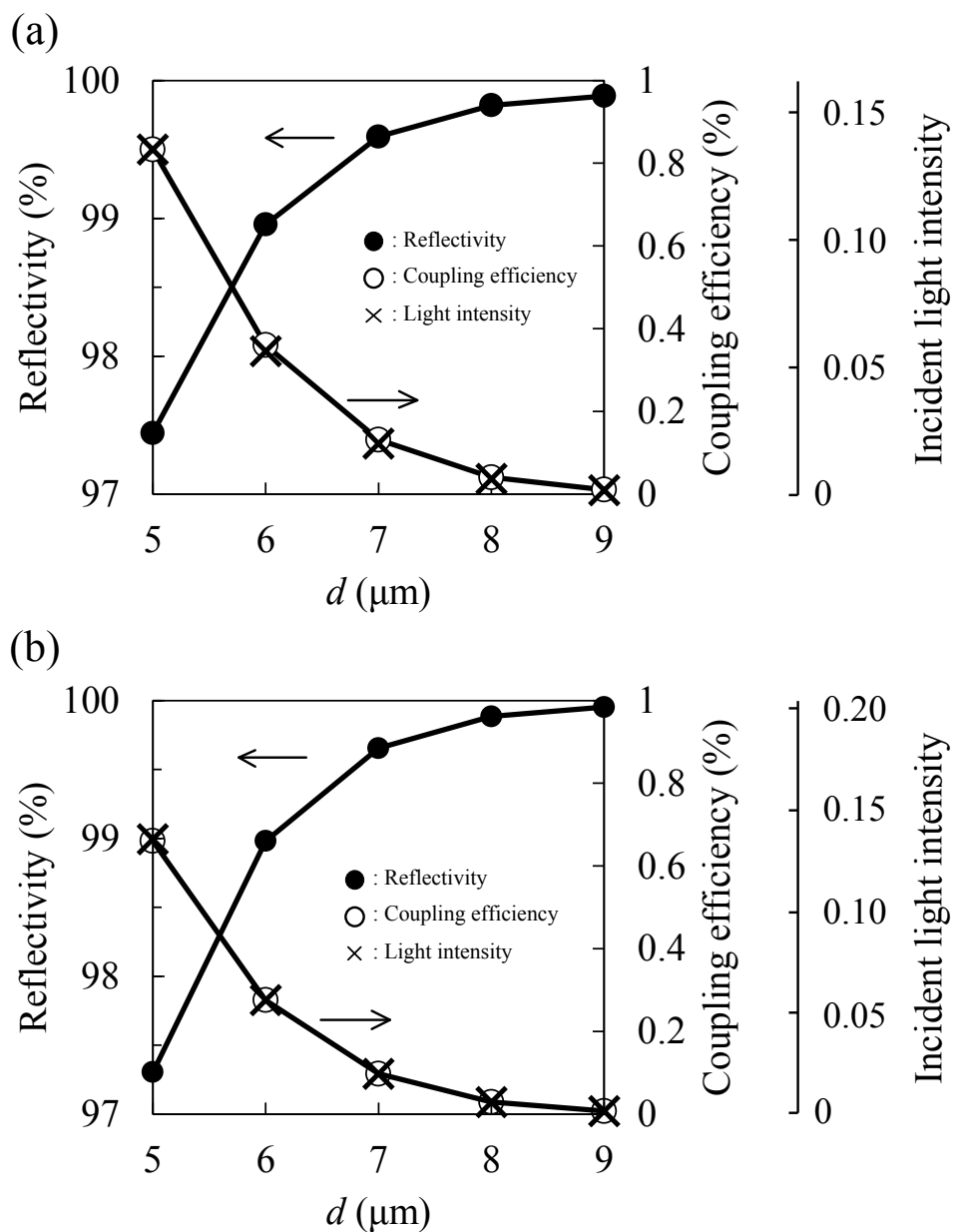


図 3-7  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  における反射率および結合効率の  $d$  依存性、(a)TE-HCG、(b)TM-HCG

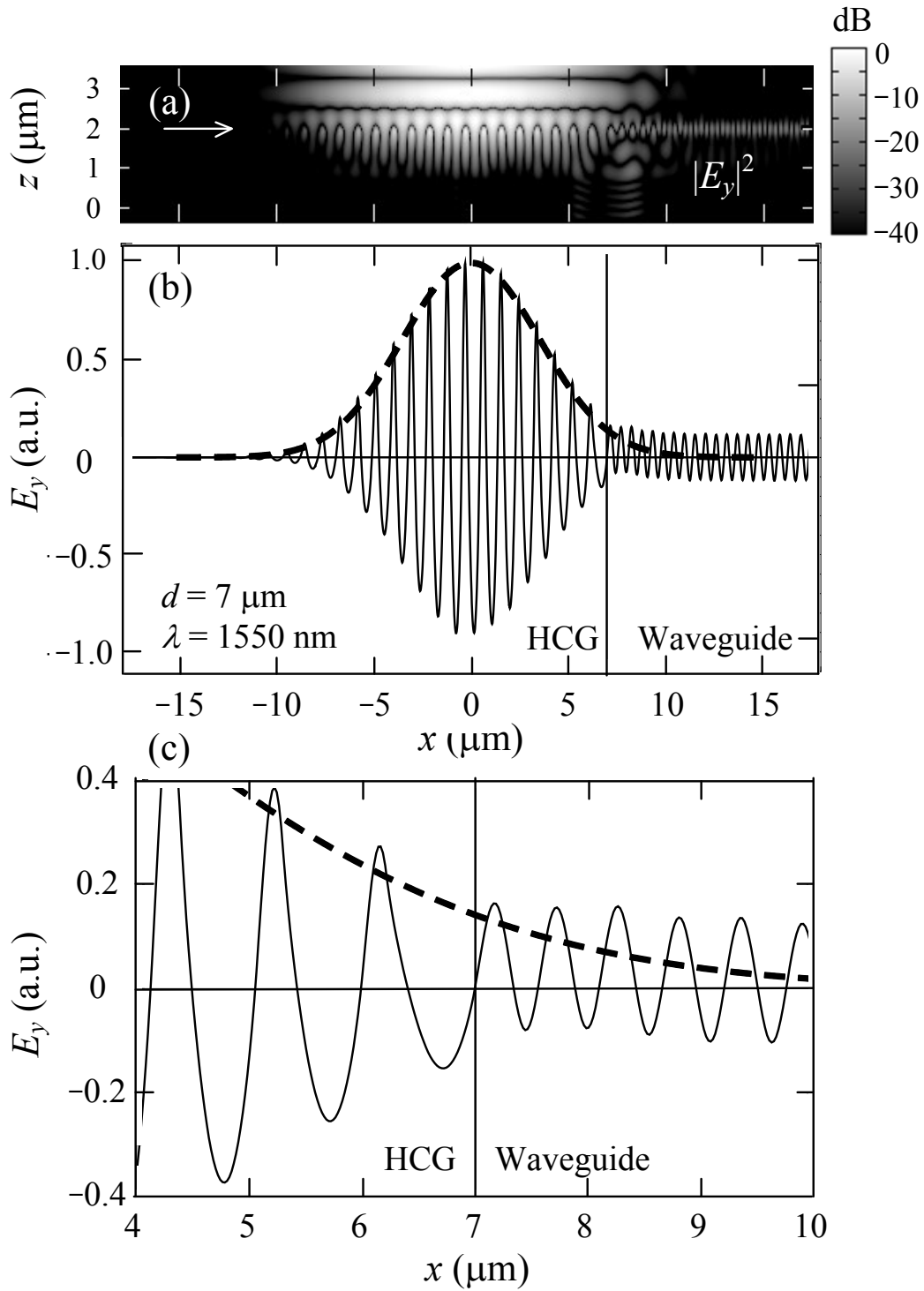


図 3-8  $d = 7 \mu\text{m}$ 、TE-HCG における(a)計算領域全体の $|E_y|^2$ 分布、(b)Si 層中央 ((a)の白矢印)での  $E_y$  分布 (実線)および光源の  $E_y$  分布 (破線)、(c)(b)の HCG と光導波路の結合部の拡大



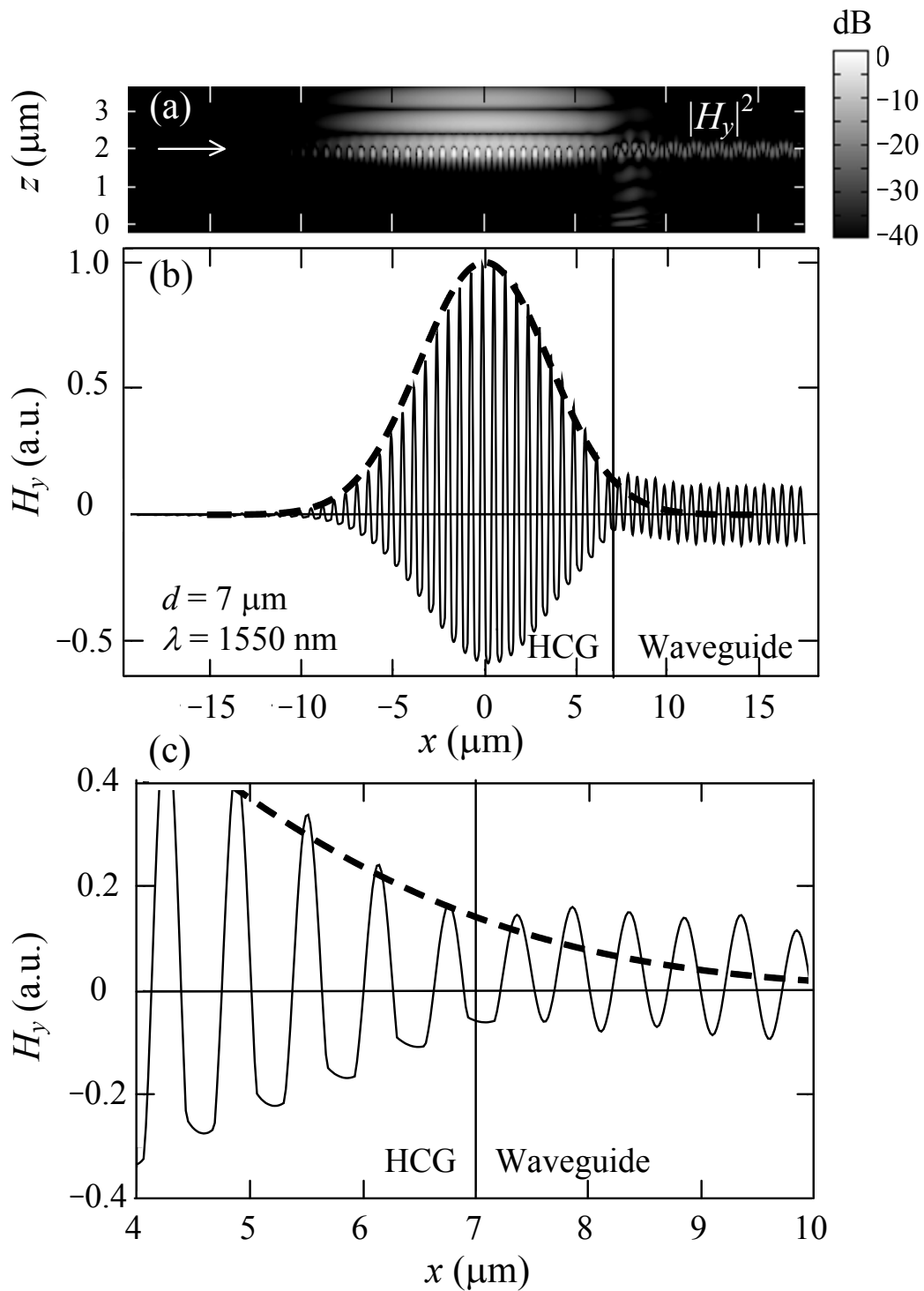


図3-9  $d = 7 \mu\text{m}$ 、TM-HCGにおける(a)計算領域全体の $|H_y|^2$ 分布、(b)Si層中央((a)の白矢印)での $H_y$ 分布(実線)および光源の $H_y$ 分布(破線)、(c)(b)のHCGと光導波路の結合部の拡大

### 3-2-3 出力光導波路の伝搬モード

本章では 2 次元の FDTD 法を用いているため、図 3-1 のように座標系を規定すると  $y$  軸方向への電磁場の変化がないと考えることができる。これをマクスウェル方程式に適用すると、光導波路を伝搬する TE モードは  $E_y$ 、 $H_x$  および  $H_z$ 、TM モードは  $E_x$ 、 $E_z$  および  $H_y$  で構成される。TE および TM-HCG の入射光には、それぞれ  $E_y$  と  $H_x$ 、 $E_x$  と  $H_y$  で構成される直線偏光を設定しているため、伝搬モードはそれぞれ TE および TM モードになる。対称な 3 層スラブ導波路では、TE、TM の両モードに対する遮断膜厚  $a_{cutoff}$  は式 (3-1) で与えられる[4]。

$$a_{cutoff} = \frac{\pi}{k_0 \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}} m = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}} m \quad (3-1)$$

$k_0$ 、 $\lambda_0$  はそれぞれ真空中の波数および波長であり、 $n_{core}$ 、 $n_{clad}$  はそれぞれコアおよびクラッドの屈折率である。また、 $m$  は 0 を最低次とする伝搬モードの次数である。コアが Si ( $n_{core} = 3.48$ )、クラッドが SiO<sub>2</sub> ( $n_{clad} = 1.48$ ) で構成される対称な 3 層スラブ導波路では、1 次モードおよび 2 次モードを遮断する膜厚はそれぞれ、246、492 nm である。

光導波路結合型 HCG の光導波路出力を別の素子へ入力することを考えると、光導波路出力の伝搬モードは基本モードであることが望ましい。表 3-1 に示したように広帯域で高反射率を示す TE-および TM-HCG の  $T_G$  はそれぞれ、217、443 nm である。つまり、TE-HCG では面内光導波路の伝搬モードは単一モード条件を満たすため基本モードのみが伝搬するが、TM-HCG では 1 次モードも伝搬する。図 3-8(a)で示した TE-HCG のフィールド分布では、面内光導波路内の波面が直進しており、基本モードが伝搬している。一方、図 3-9(a)で示した TM-HCG のフィールド分布では、面内光導波路内の波面が蛇行しており、広帯域で高反射率が得られる TM-HCG を使用した光導波路結合型 HCG の面内光導波路には 2 つのモードが混在して伝搬する。

TM-HCG の面内光導波路においても基本モードのみが伝搬するように  $T_G$  を遮断膜厚以下である 240 nm に固定して、高反射率帯が得られる構造を検討した。 $\lambda = 1550$  nm 付近で広帯域な高反射率が得られるように最適化した HCG の構造パラメータを表 3-2 に示し、反射率スペクトルを図 3-10 の赤線で示す。単一モード構造では高反射率の帯域が大幅に狭くなっており、VCSEL 用の鏡としては適さないと考えられる。そこで、 $T_G$  を厚くしていき、1 次モードも伝搬可能であるが 0 次モードが主に伝搬する  $T_G$  を求めた。この擬単一モード構造のパラメータを表 3-2 に示す。図 3-10 の青線で示すように擬単一モード構造においては、99%以上の反射率が得られる波長帯域はおよそ 100

nm であり、VCSEL 用の反射鏡として使用可能だと考えられる。図 3-11 には  $d = 7 \mu\text{m}$  の擬単一モード構造における  $|H_y|^2$  分布を示しているが、面内光導波路内の波面が直進しており、主に基本モードが伝搬していることがわかる。なお、 $T_G$  を薄くした場合に高反射率の帯域が狭くなる理由は、高反射率帯域を 1550 nm 付近に固定したまま  $T_G$  を薄くするため、広帯域で高反射率が得られる構造の寸法比からずれるためである。

表 3-2 TM-HCG の単一モード構造、擬単一モード構造および広帯域構造のパラメータ

	$A$ (nm)	$T_G$ (nm)	$W$ (nm)	$T_{L1}$ (nm)	$T_{L2}$ (nm)
Single mode structure	870	240	440	1300	600
Quasi-single mode structure	622	360	435	1300	500
Broadband structure	632	443	241	1425	500

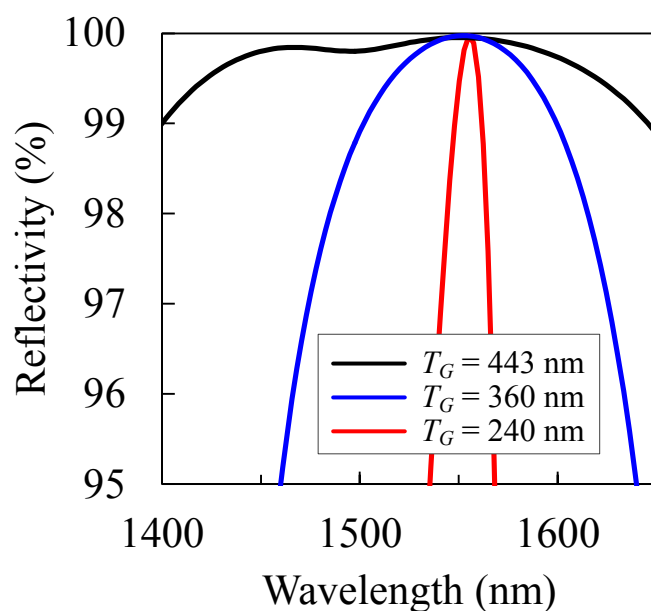


図 3-10 TM-HCG の単一モード構造 ( $T_G = 240 \text{ nm}$ )、擬単一モード構造 ( $T_G = 360 \text{ nm}$ ) および広帯域構造 ( $T_G = 443 \text{ nm}$ ) の反射率スペクトル

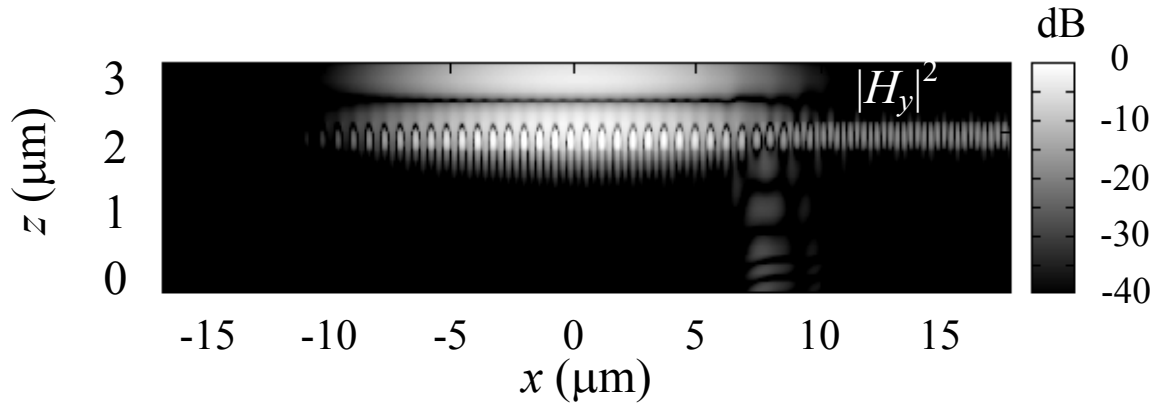


図 3-11  $d = 7 \mu\text{m}$  の擬単一モード構造における $|H_y|^2$ 分布

### 3-3 光導波路結合型 HCG-VCSEL

本節では、HCG 上に活性層および DBR を配置した光導波路結合型 HCG-VCSEL における Q 値および閾値利得の構造依存性について述べる。さらに面内光導波路へ結合する光パワーの構造依存性について述べる。なお、本節では、光導波路結合型 TE-HCG-VCSEL および光導波路結合型 TM-HCG-VCSEL をそれぞれ、TE-HCG-VCSEL および TM-HCG-VCSEL として記述する。

#### 3-3-1 計算に用いた構造

図 3-12 に本計算で扱った光導波路結合型 HCG-VCSEL の構造図を示す。HCG 上側の  $\text{SiO}_2$  の上に、活性層および 20 組の DBR を配置している。活性層は、厚さ 5.4 nm の 7 層の  $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$  QWs と厚さ 8.6 nm の  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.48}\text{P}_{0.52}$  障壁層 および InP スペースで構成されており、屈折率はそれぞれ 3.51、3.33、3.17[2、5、6]である。 $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As} / \text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$  DBR (屈折率: 3.34 / 2.96[2])は HCG 側の 5 組を残して、幅  $10 \mu\text{m}$  のメサ形状にしている。光導波路の始点は、メサの中央からの距離  $d$  で定義した。HCG 部分は表 3-1 の構造パラメータを用いたが、共振波長を 1550 nm にするために  $T_{L2}$  を TE-HCG-VCSEL では 970 nm、TM-HCG-VCSEL では 520 nm にした。入射光源は、メサ部分の基本モードの強度分布に設定し、活性層内に配置した。入射光の偏光は、TE-HCG-VCSEL に対しては  $E_y$  および  $H_x$  成分から構成される直線偏光、TM-HCG-VCSEL に対しては  $E_x$  および  $H_y$  成分から構成される直線偏光とした。共振器内の光パワーおよび光導波路出力パワーは、それぞれ Monitor A および Monitor C で観測した。Monitor A は活性層の中央に配置し、Monitor C は光導波路

始点から  $x$  方向に  $5 \mu\text{m}$  離して配置した。計算領域は PML で規定し、計算メッシュの大きさは  $50 \text{ nm}$  である。ただし、QWs などの  $50 \text{ nm}$  以下の領域には各層厚に相当するメッシュを配置している。

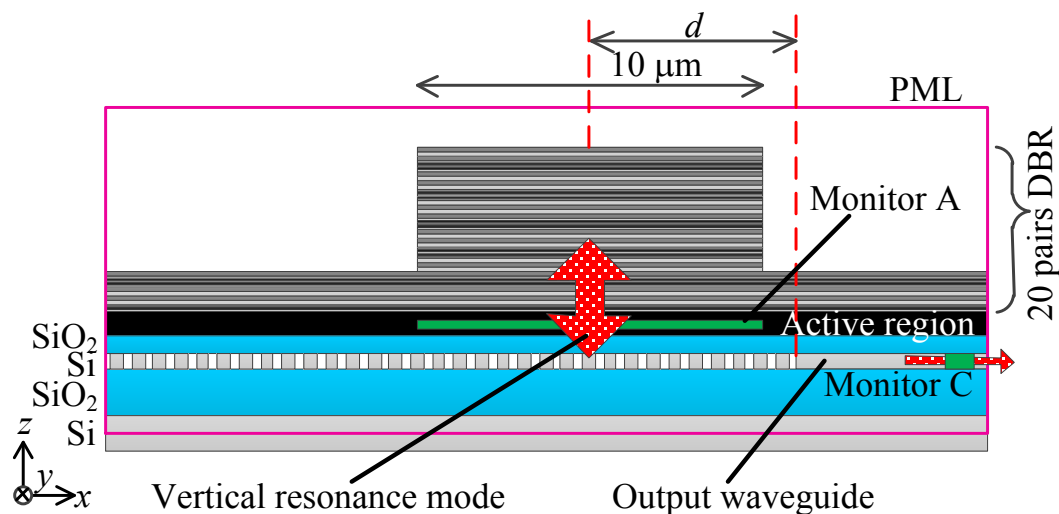


図 3-12 光導波路結合型 HCG 構造

### 3-3-2 光導波路出力の構造依存性

まず、VCSEL 共振器に光導波路がどのような影響を与えるかを調べるために、量子井戸に利得を与えずに共振器の光の閉じ込めの良さを表す指標である  $Q$  値を求めた。 $Q$  値は共振波長  $\lambda_c$  と共振スペクトルの半値全幅 FWHM を用いて式 (3-2) のように関係づけられる[4]。

$$Q = \frac{\lambda_c}{\text{FWHM}} \quad (3-2)$$

FullWAVE では、共振器構造に対して単パルスを入射して定常状態までの光強度の時間応答をフーリエ変換することで共振スペクトルが求められる。また、 $Q$  値は共振モードの減衰時間に相当する光子寿命  $\tau$  から求められ、式 (3-3) で定義される[4]。

$$Q = \omega\tau \quad (3-3)$$

ここで、 $\omega$  は共振周波数である。FullWAVE では、共振波長に設定した連続光を定常状態になるまで入射した後、光入射を止め、光強度の時間変化の傾きから  $\tau$  が求められる。

式 (3-2) で示した共振スペクトルの半値全幅から求めた  $Q$  値の  $d$  依存性を図 3-13 に示す。メサと光導波路が離れており、光導波路が共振器に与える影響が少ないと考えられる  $d = 6 \sim 9 \mu\text{m}$  付近の  $Q$  値は TE-HCG-VCSEL では 1000 程度であるのに対し

て、TM-HCG-VCSEL では 3000 程度となり 3 倍程度大きな Q 値が得られることがわかった。なお、式(3-3)に示した光子寿命から求めた Q 値も同様の値であった。この両 HCG 構造における Q 値の差異の原因については後述する。TE-、TM-HCG-VCSEL の両構造において、 $d$  が  $5 \mu\text{m}$  よりも小さくなると、メサ、つまり共振横モードが光導波路と重なり、反射率が低下するため Q 値が減少する。これは、3-2-2 で述べた光導波路結合型 HCG において入射光と光導波路の重なりが大きくなるにつれて反射率が低下する結果と一致する(図 3-7)。

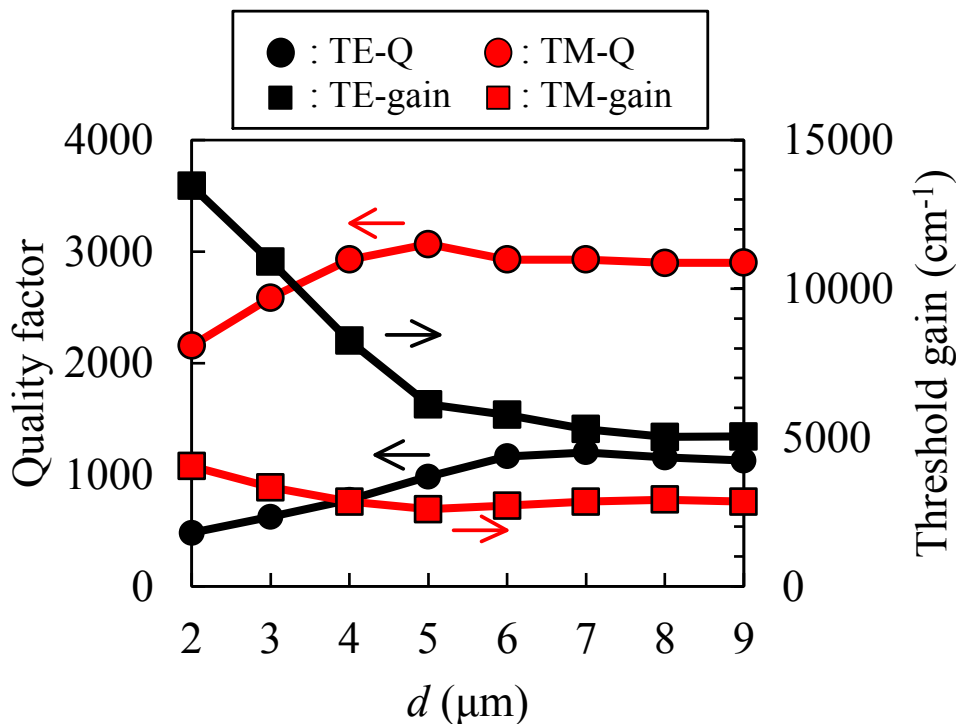


図 3-13 TE および TM-HCG における Q 値と閾値利得の  $d$  依存性

幅  $10 \mu\text{m}$  メサの直下に位置する QWs に光利得を与えて求めた VCSEL 共振器の発振閾値利得を図 3-13 に示す。Q 値の低下に伴い、共振器内に局在する光強度も低下するため、発振に必要な閾値利得が上昇する。閾値利得が大きくなるとレーザ発振閾値も上昇するため、 $d$  の減少にともなってレーザ発振閾値も上昇するといえる。

反射率が高くなるにつれて共振器の Q 値が上昇し、定常状態になるまでの時間が増大する。そこで、本計算では計算時間短縮のため、 $\lambda = 1550 \text{ nm}$  で 98.0% の反射率を有する 20 ペアの DBR を使用した。したがって、より多いペア数の DBR を使用して Q 値の高い VCSEL 共振器について同様の計算を行えば、閾値利得を下げる事が可能であると考えられる。

図 3-14(a)は TE-HCG-VCSEL の  $d = 6 \mu\text{m}$  における  $|E_y|^2$  分布である。(b)は(a)中の白矢印で示した Si 層中央の  $E_y$  分布を実線で、入射光の  $E_y$  分布を破線で示している。(c)は(b)の HCG と光導波路の結合部の拡大図である。同様に図 3-15 は TM-HCG-VCSEL の  $H_y$  分布を示している。図 3-14(a)と図 3-15(a)を比較すると、TE-HCG-VCSEL の方が共振器外部へ放射される光強度が著しく大きいことがわかる。これが、TM-HCG-VCSEL よりも低い Q 値および高い閾値利得の原因だと考えられる。図 3-8(a)と図 3-9(a)を比較すると、TE-HCG からの反射光が TM-HCG よりも放射状に広がっている。つまり、反射光が広がる TE-HCG を VCSEL の反射鏡として組み込んだ結果、複数回の反射を経て、広がった共振横モードになったと考えられる。

最後に、レーザ発振状態における面内光導波路出力特性について解析した。図 3-16 に共振器内の光パワーに対する光導波路出力パワーの比を  $d$  に対して示した。各光パワーは  $|S| = n |E|^2 / 2 Z_0$  を用いて電場  $|E|^2$  より求めた[7]。 $n$  は Monitor が配置されている領域の屈折率、 $Z_0$  は真空のインピーダンスである。これは、共振器内では定在波がたつため、ポインティングベクトルを直接計算すると零になるためである。ただし、共振器内の光パワーは、一方向に伝搬する波を考えるため  $|S|/2$  として求めている。なお、利得は発振閾値利得の 1.3 倍に設定した。共振横モードと導波路が重なり始める  $5 \mu\text{m}$  付近から光導波路出力が大きくなっている。 $d = 6 \mu\text{m}$  ではメサと導波路が直接は重なっていないが光導波路へ光が結合している。これは、共振横モードが HCG の位置では  $x$  方向の閉じ込めが弱く、メサの幅よりも広がっているためだと考えられる。TE-HCG-VCSEL は TM-HCG-VCSEL に比べて概ね 30 倍大きな共振器内の光パワーに対する光導波路出力パワーの比が得られる結果になった。これは、フィールド分布が著しく広がっており、光導波路との重なりも大きいためだと考えられる。

したがって、TE-HCG-VCSEL を用いると、より大きな結合効率が得られ、大きな光導波路出力が求められる場合には有用であると考えられる。しかし、Q 値が低く、閾値利得が比較的大きいため、レーザ発振閾値が大きくなることが懸念される。一方で、TM-HCG-VCSEL では、比較的発振閾値が低くなるが、光導波路出力は小さくなる。つまり、それぞれの構造が長所および短所を有しており、それらを補償するようなデバイス設計 (TE-HCG-VCSEL の DBR の反射率向上など) が重要になると考えられる。

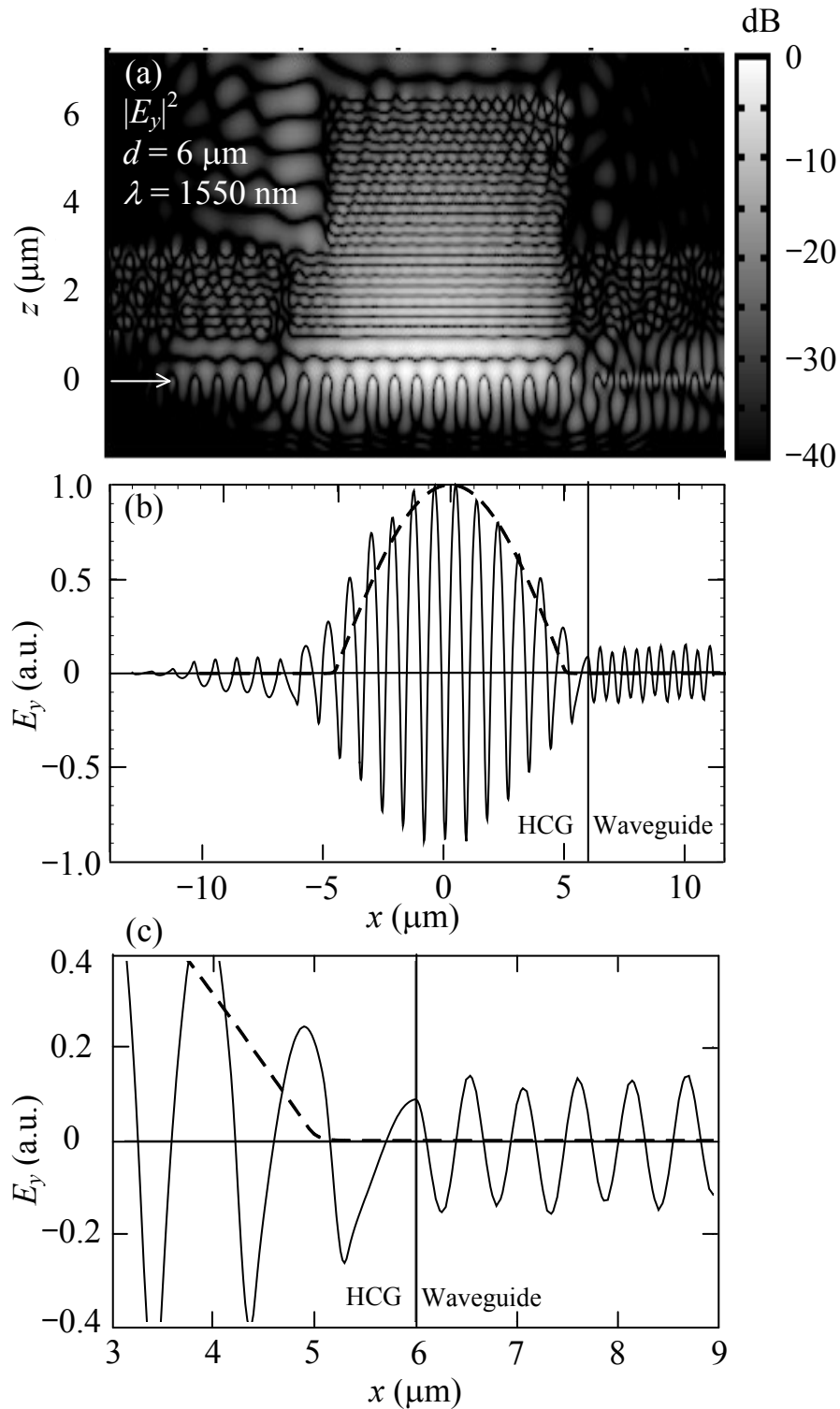


図 3-14  $d = 6 \mu\text{m}$ 、TE-HCG-VCSEL における(a)計算領域全体の $|E_y|^2$ 分布、(b)Si 層中央((a)の白矢印)での  $E_y$  分布(実線)およびメサの基本モードの  $E_y$  分布(破線)、(c)(b)の HCG と光導波路の結合部の拡大



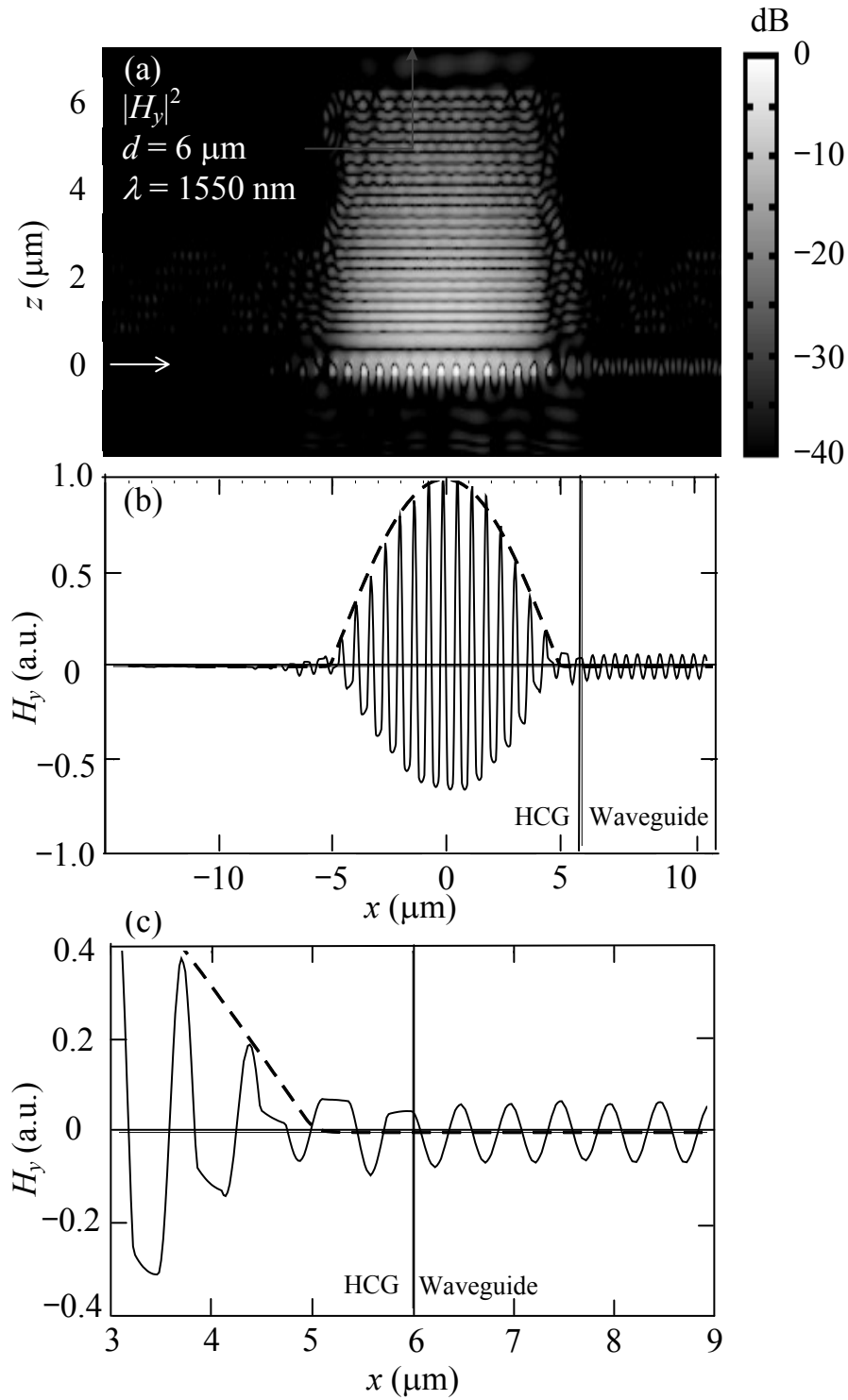


図 3-15  $d = 6 \mu\text{m}$ 、TM-HCG-VCSEL における(a)計算領域全体の $|H_y|^2$ 分布、(b)Si層中央((a)の白矢印)での $H_y$ 分布(実線)およびメサの基本モードの $H_y$ 分布(破線)、(c)(b)のHCGと光導波路の結合部の拡大

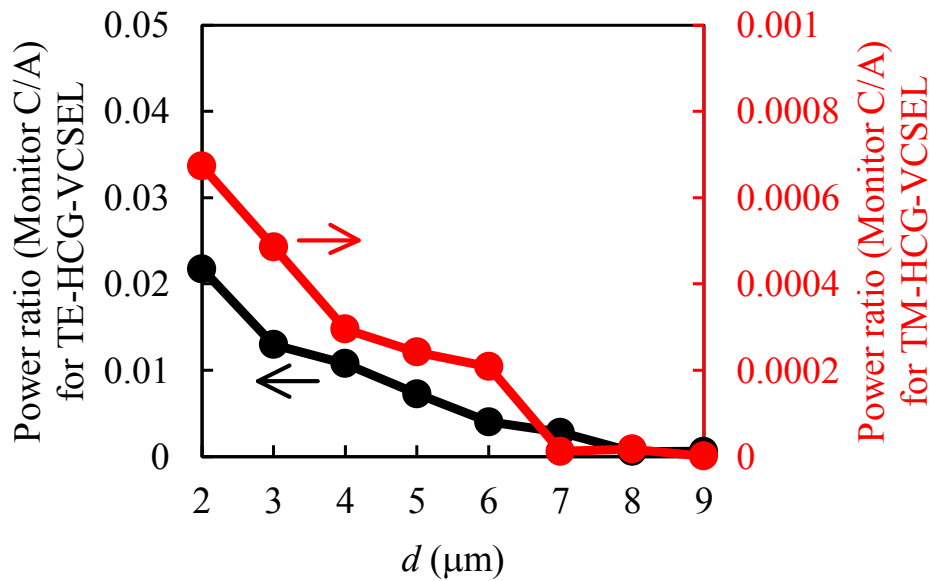


図 3-16 TE および TM-HCG-VCSEL における共振器内の光パワーに対する光導波路出力パワー比の  $d$  依存性

### 3-3-3 デバイス設計指針

図 3-13 より、 $d = 5 \mu\text{m}$  になるように、つまり光導波路始点とメサ端を合わせるように設計し、その位置ずれ作製誤差を  $1 \mu\text{m}$  以内に抑えれば、発振閾値利得の大きな上昇を抑えられる。また、図 3-16 より、同様の位置ずれ作製誤差 ( $d = 4 \sim 6 \mu\text{m}$ ) であれば、共振器内の光パワーに対して TE-HCG-VCSEL ではおよそ 0.7%、TM-HCG-VCSEL ではおよそ 0.02% の光導波路出力が得られる。直感的な理解を得るために、実際に面内光導波路を伝搬する光パワーを概算した。典型的な VCSEL の面発光出力パワーを 1 mW、DBR の反射率を 99.8% と仮定する[8]。このとき、共振器内の光パワーに対する面発光出力パワーの比は DBR の透過率に相当する 0.2% と考えることができる。光導波路結合型 HCG-VCSEL においても同様に仮定すれば、共振器内の光パワーに対する出力光導波路の光パワーの比は  $d = 5 \mu\text{m}$  の TE-HCG-VCSEL では 0.7%、TM-HCG-VCSEL では 0.02% であるため、それぞれ 3.5 および 0.1 mW の光導波路出力パワーが得られる。ただし、本計算は 2 次元構造を計算対象としたため、 $y$  軸方向には構造の変化がなく、光導波路の幅とメサの幅が同一である。実際のデバイスにおいて、単一モード条件を満たすためには光導波路幅をメサの幅に比べて細くする必要があり、それにとまって光導波路への結合効率および伝搬パワーは小さくなると考えられる[9]。

### 3-4 まとめ

本章では、2次元 FDTD 法を用いて、格子に平行な直線偏光に高反射率を示す TE-HCG および直交する直線偏光に高反射率を示す TM-HCG に光導波路を結合した2種類の光導波路結合型 HCG に対して反射率、結合効率および伝搬モードの構造依存性について述べた。また、光導波路を結合した TE-HCG および TM-HCG を片側反射鏡とした VCSEL 共振器に対して Q 値、閾値利得および光導波路出力の構造依存性について述べた。以下に得られた知見を示す。

- (1) HCG の構造が主に反射率特性に影響を与え、光導波路始点における光強度が結合効率に最も大きな影響を与えることがわかった。
- (2) 広帯域で高反射率が得られる HCG 構造での格子の厚みは TE-HCG の方が TM-HCG よりも半分程度薄くなる。その結果、光導波路結合型 TE-HCG の光導波路は単一モード条件を満足するため基本モードのみが伝搬するが、TM-HCG の光導波路には1次モードも混在して伝搬する。
- (3) 光導波路結合型 HCG-VCSEL においても光導波路に結合する光パワーは光導波路始点の光強度に比例する。光導波路結合型 TE-HCG-VCSEL の共振器内の光導波路出力は、光導波路結合型 TM-HCG-VCSEL の30倍程度大きくなるが、Q 値は1/3程度になる。つまり、光導波路結合型 TM-HCG-VCSEL に比べて、TE-HCG-VCSEL は大きな光導波路出力が得られる一方で発振閾値が上昇する。
- (4) 光導波路始点とメサ端の位置ずれ作製誤差を  $1\ \mu\text{m}$  以内に制御できれば、発振閾値利得の大きな上昇を抑えつつ、共振器内の光パワーに対して光導波路結合型 TE-HCG-VCSEL では0.7%程度、光導波路結合型 TM-HCG-VCSEL では0.02%程度の光導波路出力が得られる。

### 3-5 参考文献

- [1] I. S. Chung and J. Mørk, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 151113 (2010).
- [2] E. D. Palik, 「Handbook of Optical Constants of Solid I-III」, Academic Press (1991).
- [3] 伊賀 健一, 小山 二三夫, 「面発光レーザの基礎と応用」, 共立出版株式会社 (1999).
- [4] ヤリーブ-イェー, 「光エレクトロニクス 基礎編」, 丸善株式会社 (2010).
- [5] R. E. Nahory, M. A. Pollack, W. D. Johnston, Jr., and R. L. Barns, *Appl. Phys. Lett.* **33**, 659 (1978).
- [6] S. Adachi, *J. Appl. Phys.* **53**, 5863 (1982).
- [7] 国分 泰雄, 「光波工学」, 共立出版株式会社 (1999).
- [8] R. W. Herrick and P. M. Petroff, *IEEE J. Quantum Electron.* **34**, 1963 (1998).
- [9] Y. Tsunemi, K. Ikeda, H. Kawaguchi, *Appl. Phys. Express* **6**, 092106 (2013).

## 第 4 章 光導波路結合型 HCG-VCSEL における出力光導波路

### 切替の解析

#### 4-1 はじめに

偏光無依存 HCG に格子に沿った 2 方向の光導波路を結合し、偏光双安定 VCSEL の片側反射鏡として用いた光導波路結合型 HCG-VCSEL における光出力特性に関する報告はない。もし、偏光双安定 VCSEL の発振偏光状態で光導波路出力の特性を制御できた場合、その応用分野はさらに広がると考えられる。

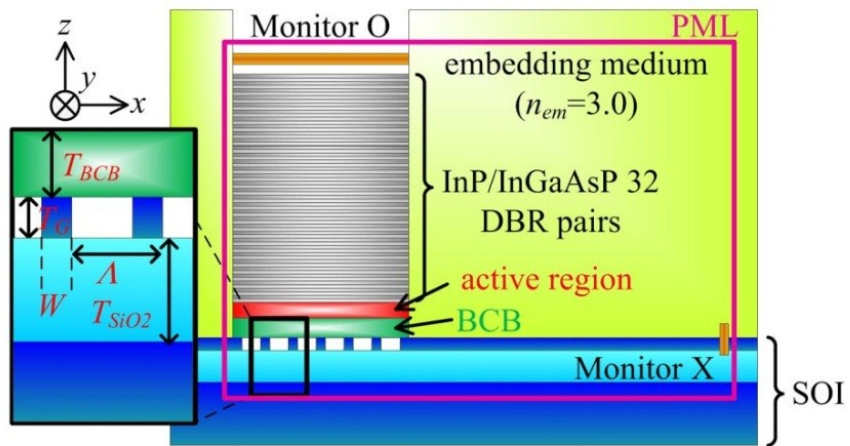
そこで本章では、複数の光導波路を結合した偏光無依存 HCG を片側反射鏡とした偏光双安定 VCSEL に対して 3 次元 FDTD 法による光出力特性の解析を行った。ただし、ここでは、単一の光導波路結合型 HCG-VCSEL の光出力特性について検討した。つまり、VCSEL への光導波路入力による発振偏光制御や、複数の VCSEL が光導波路で結合された構造は扱わない。

#### 4-2 計算に用いた構造

計算に用いた光導波路結合型 HCG-VCSEL の構造を図 4-1 に示す。図 4-1(a) は  $x$ - $z$  断面を示しており、(b) は Si 層中央における  $x$ - $y$  断面を示している。SOI 基板の Si 層に 6.5 周期(格子 7 本)の HCG および  $x$ 、 $y$  方向の光導波路を形成している。 $4 \times 4 \mu\text{m}$  角に形成した 11 周期の TM-HCG および  $3 \times 3 \mu\text{m}$  角に形成した 4 周期の TE-HCG を用いた VCSEL の電流注入発振が実現されているため、本計算に用いた HCG 領域は妥当な大きさとする[1]。

まず、HCG の反射率が波長  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  付近で最も広帯域・高反射率になるように構造の最適化を行った。図 4-2 に反射率計算構造を示す。 $x$  および  $y$  方向(図 4-2 中の赤線)の単位セルに PBC を適用し、構造に周期性が無い  $z$  方向(図 4-2 中の白線)には PML を適用した。 $E_x$  直線偏光の入射光を設定し、HCG からの反射光を Power Monitor で観測した。 $A = 884 \text{ nm}$ 、格子の幅  $W = 283 \text{ nm}$ 、回折格子および光導波路の厚さ  $T_G = 400 \text{ nm}$ 、 $\text{SiO}_2$  の厚さ  $T_{\text{SiO}_2} = 1000 \text{ nm}$  としたときの反射率スペクトルの計算結果を図 4-3 示す(表 4-1)。なお、回折格子の間は空気としている。反射率 99% 以上の帯域がおよそ  $100 \text{ nm}$  に渡って得られていることがわかる。

(a)



(b)

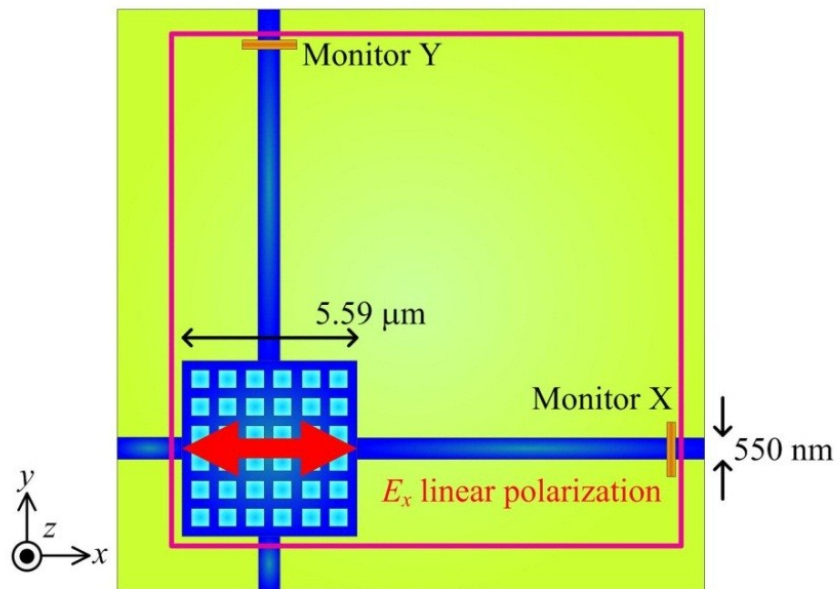


図 4-1 光導波路結合型 HCG-VCSEL の計算構造

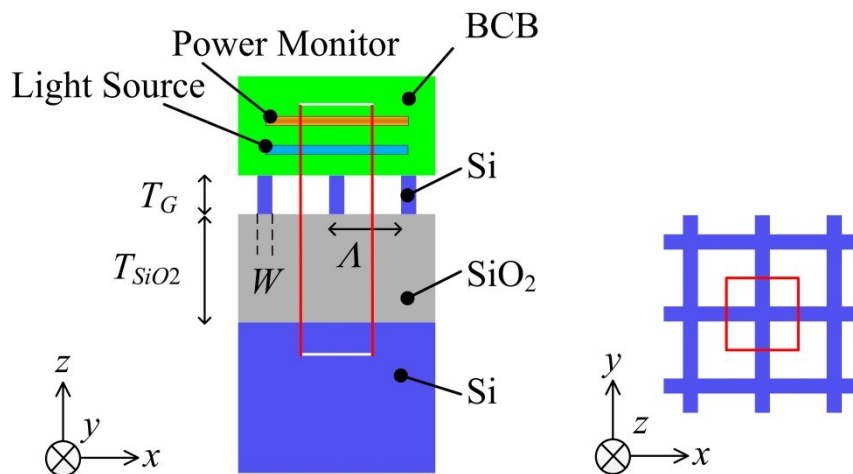


図 4-2 HCG の反射率計算構造。赤線は PBC、白線は PML を表している。

表 4-1 図 4-3 の構造における最適パラメータ(単位: nm)

$\Lambda$ (nm)	$T_{Si}$ (nm)	$W$ (nm)	$T_{SiO_2}$
884	400	283	1000

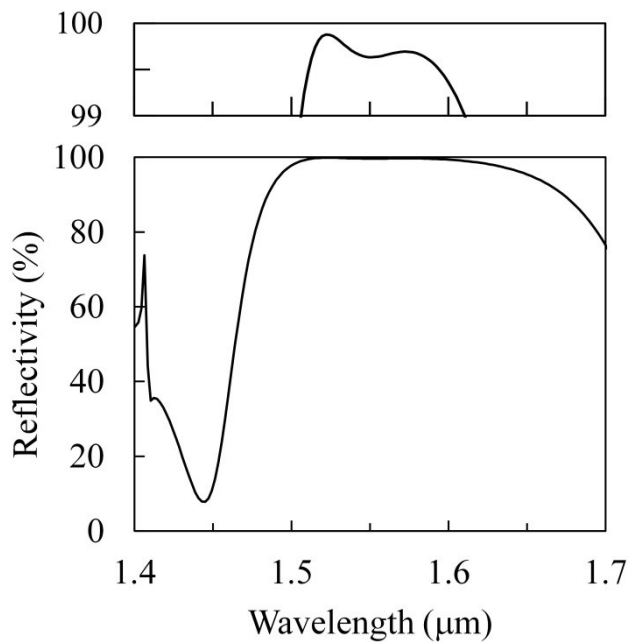


図 4-3 HCG の反射率スペクトル

HCG 上に BCB を介して活性層および DBR を配置した。BCB 層は VCSEL の活性層の接着、および共振器長の位相調整のために配置している。活性層は、9 層の  $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$  QWs (5.4 nm) と  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.48}\text{P}_{0.52}$  の障壁層 (8.1 nm) およびスペーサで構成されており、屈折率はそれぞれ  $n_{\text{well}} = 3.51$ 、 $n_{\text{barrier}} = 3.30$  である。DBR は 32 ペアの  $\text{InP}/\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.74}\text{P}_{0.26}$  DBR ( $n_{\text{InP}} = 3.17 / n_{\text{InGaAsP}} = 3.43$ ) である。1.55  $\mu\text{m}$  帯の VCSEL が安定に単一横モードで発振するメサの大きさは 10  $\mu\text{m}$  角程度以下である[2]。そこで、本計算では、簡単のため活性層および DBR は、HCG の領域に相当する 5.59  $\mu\text{m}$  角のメサ形状にし、偏光双安定 VCSEL を仮定した。HCG、BCB、活性層および DBR を含んだ構造に対して BCB 膜厚をパラメータとした計算を行い、共振波長が 1550 nm になる BCB の膜厚  $T_{\text{BCB}}$  を 580 nm とした。

本計算では、基本的な光導波路出力特性を調べるために、単一モード光導波路を用いた。図 4-1 に示すように、コアを厚さ 400 nm、幅 550 nm の Si、下側クラッドを  $\text{SiO}_2$ 、上側および左右のクラッドを高屈折率埋め込み材料( $n_{\text{em}}=3.0$ 、アモルファス GaP など [3])とした場合、TE および TM モードの基本モードのみ伝搬する。

メサ部分の基本モードの強度分布を有する  $E_x$  直線偏光の光を入射光に設定として共振器内部に配置した。なお、光源の空間分布は DBR の平均屈折率  $n = 3.3$  をコア、埋め込み材料  $n_{\text{em}} = 3.0$  をクラッドとした正方形の光導波路に対してビーム伝搬法を適用して数値的に求めた。

各光導波路へ結合、伝搬した光の強度分布は、光導波路始点から 10  $\mu\text{m}$  離して配置した Monitor X および Monitor Y で観測した。なお、伝搬パワーは光強度の空間分布を Monitor X、Y の面積で積分して求めた。その面積は光導波路伝搬モードの光強度が 1/1000 になる  $1540 \times 980$  nm とした。DBR の最表層から 500 nm 離れた位置にメサの大きさに相当する Monitor O を配置して面発光出力を観測し、共振器内部の光強度を求めるために活性層中央にメサの大きさに相当する Monitor A を配置した。構造に周期性が無い場合、計算領域は PML で規定しており、計算メッシュの大きさは 30 nm とした。ただし、QWs などの 30 nm 以下の領域には各層厚に相当するメッシュを配置している。また、本計算では光利得は考慮していない。



## 4-3 光出力特性

### 4-3-1 各出力パワーの相対関係

図 4-4 に定常状態における  $y$ - $z$  ( $x = 0$ )、 $x$ - $y$  ( $z = 0$ ) および  $x$ - $z$  ( $y = 0$ ) 断面の  $|E_x|^2$  分布を示す。共振モードの偏光方向は  $E_x$  方向である。このとき、VCSEL の共振方向に垂直な  $y$  方向の光導波路へ強く光が伝搬していることがわかる。表 4-2 に各 Monitor で観測した光パワーの相対関係を示す。なお、各光パワーは 3-3-2 でも述べたように、光導波路出力および面発光出力に対しては、 $|S| = n |E|^2 / 2 Z_0$ 、共振器内に対しては  $|S| = n |E|^2 / 4 Z_0$  を用いて求めた。光導波路出力の伝搬パワーを求めると、 $x$  方向光導波路に対して  $y$  方向光導波路へは 11.9 倍大きなパワーが伝搬することがわかった。図 4-1 に示した構造は  $90^\circ$  の回転対称性があり、偏光双安定 VCSEL を仮定している。つまり、共振モードの偏光方向が  $E_y$  方向に切り替わった場合、光が強く出力される光導波路も  $x$  方向光導波路に切り替わると考えられる。したがって、この計算結果は偏光双安定 VCSEL の発振偏光方向のスイッチングによって出力光導波路を消光比 11.9 で切り替えられることを示している。

表 4-2 より、 $y$  方向光導波路の出力光パワーは、光共振器内部の 0.23%、面発光出力の 3.5% に相当する。また、ここで示した共振器内部に対する光導波路出力パワー (0.23%) は出力光導波路への結合効率と考えることができ、HCG の寸法や HCG とメサの大きさとの相対関係が変わらない限り同じ比率で得られる。面発光出力に対する光導波路出力は 3.5% と小さな値であるが、これは本計算に用いた DBR の反射率が 90% 程度と低いためだと考えられる。

ここで、3-3-3 での議論と同様に、図 4-1 のような構造では、どの程度の光導波路出力が得られるかを見積もった。典型的な VCSEL の面発光出力パワーを 1 mW、DBR の反射率を 99.8% と仮定すると[4]、共振器内の光パワーに対する面発光出力パワーの比は DBR の透過率 0.2% であり、共振器内の光パワーから面発光出力への結合効率と考えることができる。本章で扱った構造で得られる光導波路出力は共振器内の光パワーに対して 0.23% であり、これは一般的な DBR-VCSEL の結合効率に相当する。つまり、光導波路結合同型 HCG-VCSEL の出力光導波路へは DBR-VCSEL の面発光出力に相当する 1 mW 程度のパワーが伝搬することになる。HCG-VCSEL においても、室温の CW 電流注入発振で 1 mW 程度の面発光出力が得られているため[5]、光導波路結合同型 HCG-VCSEL においても 1 mW 程度の光導波路出力が得られると考えられる。

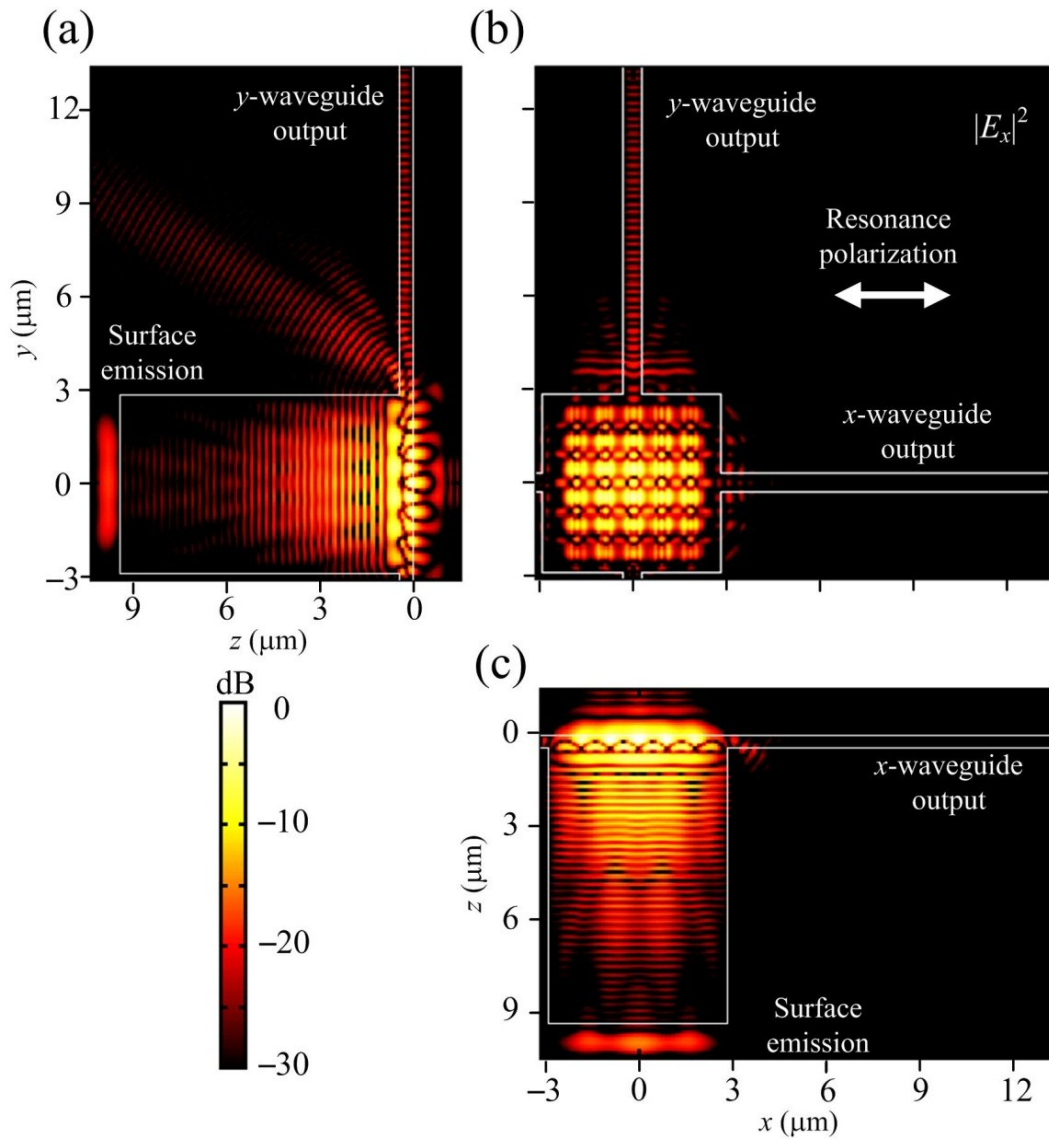


図 4-4 定常状態における(a)  $y$ - $z$  ( $x=0$ )、(b)  $x$ - $y$  ( $z=0$ )および(c)  $x$ - $z$  ( $y=0$ ) 断面の  $|E_x|^2$  分布

表 4-2 各 Monitor で観測した光パワーの相対関係

Active region (Monitor A)	1	15.7	5300
Surface emission (Monitor O)	0.0638	1	340
$x$ -waveguide output (Monitor X)	0.0002	0.003	1
$y$ -waveguide output (Monitor Y)	0.0023	0.035	11.9

次に、この光導波路出力パワーが偏光双安定 VCSEL へ光導波路入力された場合、偏光スイッチングが可能かを見積もった。1.55  $\mu\text{m}$  帯偏光双安定 VCSEL の最小スイッチングパワーとして 80 nW が報告されている[6]。簡単のため、同じ反射率を持つ DBR で形成された VCSEL を考え、その 2 つの DBR の反射率を 99.8%と仮定すると、共振器内で蓄積される光パワーは、損失を無視すると入射光パワーの  $(1+0.998)/(1-0.998)\sim 1000$  倍となる[7]。したがって、80 nW の入射光パワーでスイッチングする時の共振器内パワーは 80  $\mu\text{W}$  となる。本計算に用いた光導波路結合型 HCG-VCSEL においては、DBR の反射率が約 90%であり、簡単のために HCG の反射率も 90%であると仮定すると、1 mW の面発光出力が得られる場合の共振器内の光パワーは  $(1+0.9)/(1-0.9)\sim 20$  倍の 20 mW 程度となる。したがって、光導波路へ結合する光パワーはその 0.23%の約 50  $\mu\text{W}$  となる。光導波路から VCSEL へ光が結合し、上記と同様に共振器内に光が蓄積すると、入力パワーのおよそ 20 倍となるため、共振器内光パワーは 1 mW 程度となり、先に示した 80  $\mu\text{W}$  よりも桁違いに大きくなる。つまり、ここで示した結合効率 0.23%でも VCSEL の偏光スイッチングの可能性は十分にある。

図 4-5 に  $x$  および  $y$  方向光導波路の始点から 5、7.5、10  $\mu\text{m}$  に配置した Monitor で観測した光パワーの変化を示す。 $y$  方向光導波路では伝搬距離が 5  $\mu\text{m}$  の地点におけるパワーに対して 7.5 および 10  $\mu\text{m}$  の地点ではそれぞれ 91%および 88%のパワーが伝搬し、 $x$  方向光導波路では 83%および 72%のパワーが伝搬することがわかった。伝搬距離が 5  $\mu\text{m}$  延びた地点では、 $y$  方向光導波路を伝搬する光パワーの減衰量は小さくなる、一方  $x$  方向光導波路では減衰量が依然として大きい。つまり、 $y$  方向光導波路においては光導波路始点より 10  $\mu\text{m}$  の地点では概ね伝搬モードに収束しているが、 $x$  方向光導波路では収束していないと考えられる。したがって、さらに長く伝搬した後の光導波路出力の消光比は 11.9 よりも大きくなると考えられる。

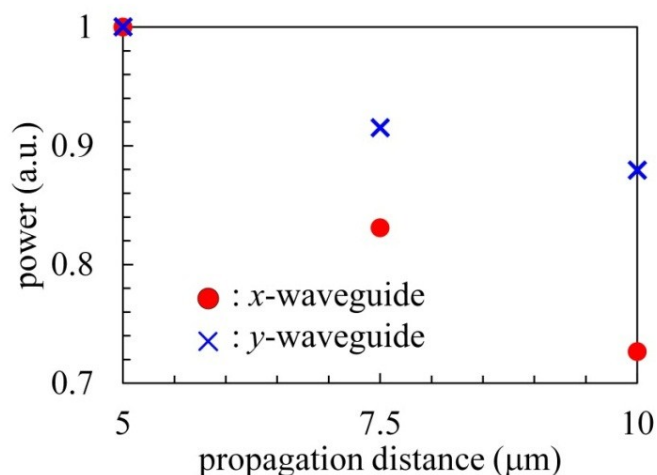
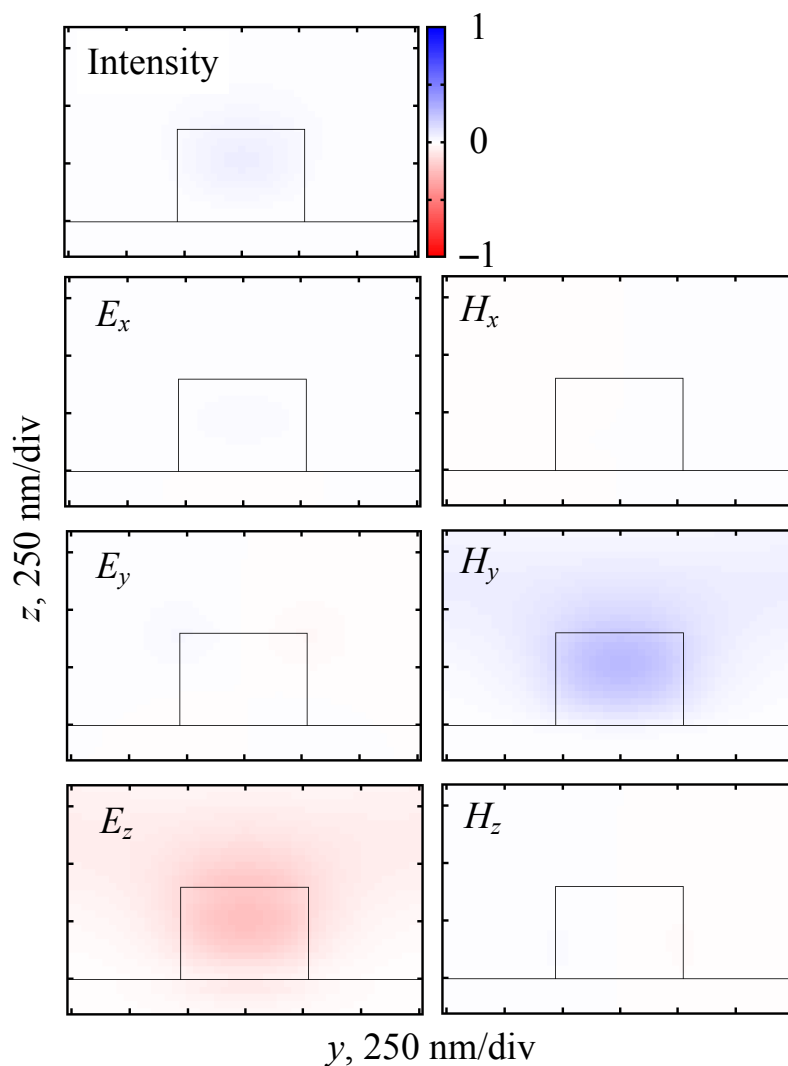


図 4-5 光導波路伝搬パワーの伝搬距離依存性

### 4-3-2 出力光導波路の伝搬モード

図 4-6 に  $x$  および  $y$  方向光導波路の光強度、電場および磁場の空間分布を示す。光強度、電場および磁場は  $y$  方向光導波路の光強度、 $E_x$  および  $H_z$  び規格化している。いずれの出力光導波路の伝搬モードも基本モードであり、 $x$  方向光導波路では  $E_z$  および  $H_y$ 、 $y$  方向光導波路では  $E_x$  および  $H_z$  が伝搬モードの主な成分であることがわかる。つまり、VCSEL の共振モードが  $E_x$  方向の場合、強く結合する  $y$  方向光導波路へは TE モード、弱く結合する  $x$  方向光導波路へは TM モードで伝搬することがわかった。VCSEL は  $E_x$  直線偏光で共振しているため、HCG 内では  $E_x$ 、 $H_y$  が主な成分となる。その結果、 $y$  方向光導波路へは  $E_x$ 、 $H_z$ 、 $x$  方向光導波路へは  $E_z$ 、 $H_y$  が伝搬モードを成す成分になったと考えられる。

(a)



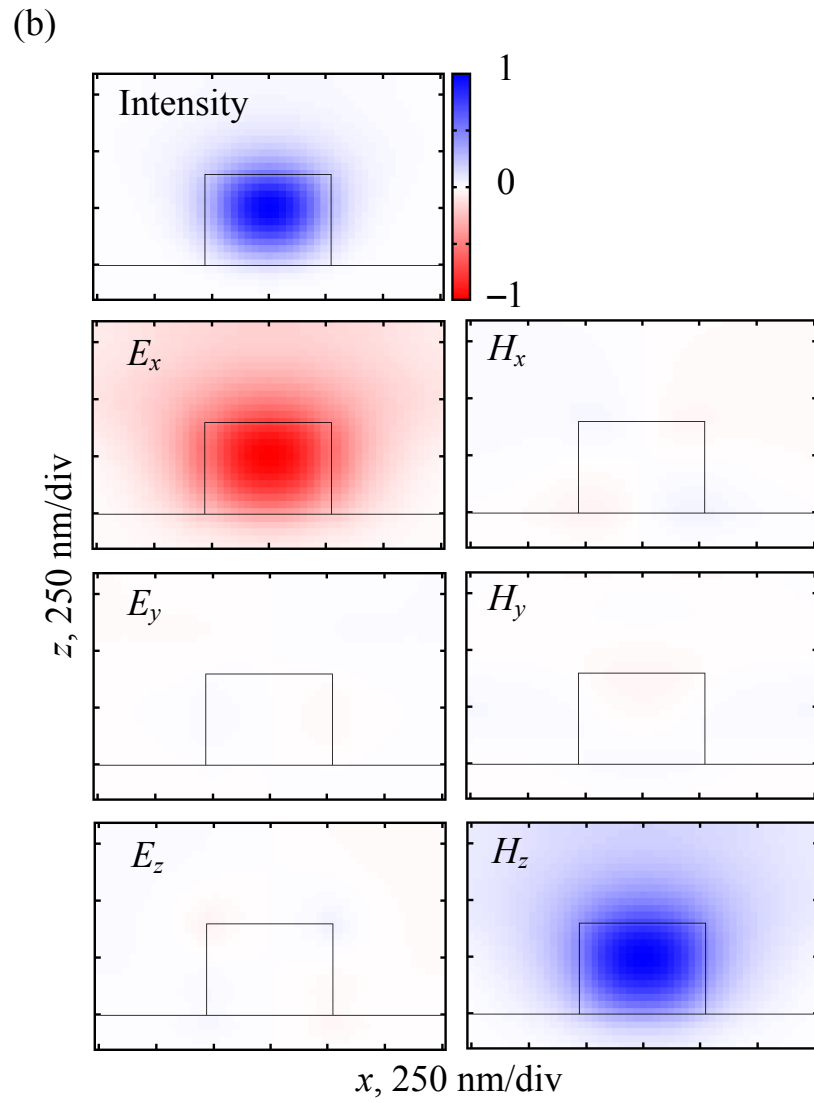


図 4-6 光強度、電場および磁場の空間分布。(a)  $x$  方向光導波路、(b)  $y$  方向光導波路

## 4-4 まとめ

本章では、3次元 FDTD 法を用いて、偏光無依存 HCG を用いた偏光双安定 VCSEL に複数の光導波路を結合した光導波路結合型 HCG-VCSEL の光出力特性について解析した。その結果、VCSEL の共振モードの偏光方向に垂直な光導波路へは平行な光導波路よりも 11.9 倍大きなパワーが伝搬することがわかった。これは目的とした機能である、偏光双安定 VCSEL の発振偏光方向により出力される光導波路を切り替えられることを示している。また、強く光が結合する光導波路へは共振器内部に対して 0.23% のパワーが伝搬することがわかった。これは、一般的な VCSEL の面発光出力に相当するパワーが得られることを示している。最後に、強く光が結合する光導波路の伝搬モードは TE モード、弱く光が結合する光導波路の伝搬モードは TM モードであることがわかった。

## 4-5 参考文献

- [1] Y. Zhou, M. C. Y. Huang, C. Chase, V. Karagodsky, M. Moewe, B. Pasala, F. G. Sedgwick, and C. J. Chang-Hasnain, *Top. Quantum Electron.* **15**, 1 (2009).
- [2] A. Syrbu, A. Mircea, A. Mereuta, A. Caliman, C.-A. Berseth, G. Suruceanu, V. Iakovlev, M. Achtenhagen, A. Rudra, and E. Kapon, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 1230 (2004).
- [3] N. Matsumoto and K. Kumabe: *Jpn. J. Appl. Phys.* **18**, 1011 (1979).
- [4] R. W. Herrick and P. M. Petroff, *IEEE J. Quantum Electron.* **34**, 1963 (1998).
- [5] C. Chase, Y. Rao, W. Hofmann, and C. J. Chang-Hasnain, *Opt. Express* **18**, 15461 (2010).
- [6] T. Katayama, Y. Sato, T. Mori, and H. Kawaguchi, *Jpn. J. Apply. Phys.* **46**, L1231 (2007)
- [7] ヤリーブ-イェー, 「光エレクトロニクス 基礎編」, 丸善株式会社 (2010).

## 第 5 章 HCG-VCSEL の設計、作製および光励起レーザ発振

### 5-1 はじめに

これまでに、HCG を反射鏡とした VCSEL のレーザ発振は数多く報告されている[1-4]。しかし、これらは全てストライプ状の HCG が用いられており、筆者らが提案、数値解析を行った井桁状の偏光無依存 HCG[5、6]を VCSEL に組み込んだ例はない。そこで、偏光双安定 VCSEL の発振偏光方向によって出力光導波路を切り替えられる光導波路結合型 HCG-VCSEL の実現に向けて、光導波路がない偏光無依存 HCG を片側反射鏡とした VCSEL のレーザ発振を目指した。

本章では、デバイス構造、設計方針および格子間が BCB で埋まった偏光無依存 HCG の反射率特性について述べた後、デバイス作製プロセスについて述べる。また、作製したデバイスのレーザ発振特性について述べる。

### 5-2 HCG-VCSEL の設計

ここでは、HCG-VCSEL のデバイス構造の概要について述べ、デバイスに使用した DBR ウェハおよび活性層ウェハの特性について述べる。また、数値解析を基にした偏光無依存 HCG の構造決定および BCB 膜厚と共振波長の関係について述べる。

#### 5-2-1 デバイス構造

図 5-1 に HCG-VCSEL のデバイス構造を示す。VCSEL は、SOI 基板上の偏光無依存 HCG、BCB のボンディング層、活性層を保護する 2 ペアの InP/InGaAsP DBR、9 層の InGaAsP QWs を含む活性層および 35 ペアの AlGaAs DBR から構成される。一般的な VCSEL ウェハは活性層とそれを挟む DBR を一括して結晶成長される。一方、図 5-1 に示した HCG-VCSEL は、結晶成長のみでは VCSEL 共振器を形成できないため、異種材料貼り合わせ技術、具体的には DBR と活性層はウェハ直接ボンディング、活性層と HCG は BCB を接着材料として用いた BCB ボンディングを使用して VCSEL 共振器を構成する。

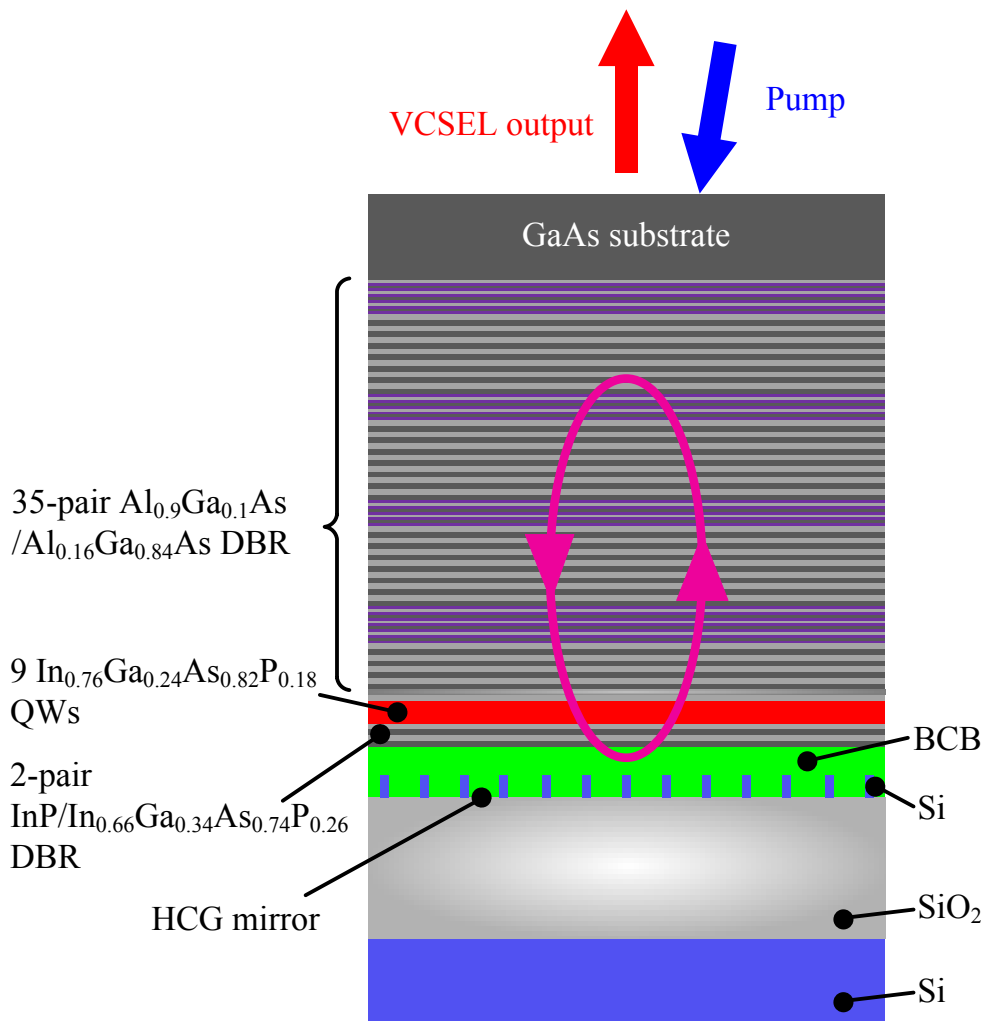


図 5-1 HCG-VCSEL 構造

### 5-2-2 DBR ウェハ

波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯の半導体レーザの活性層材料としては、InGaAsP などが用いられる[7、8]、その DBR を構成する材料としては InGaAsP/InP があげられる[9]。しかし、本研究では DBR のペア数を減らせる  $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  DBR を使用した。DBR ウェハの層構造を図 5-2 に示す。DBR は有機金属気相成長 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD) 法によって GaAs 基板の上に成長されており、35 ペアの高屈折率層 ( $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ ) と低屈折率層 ( $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ ) の間に組成遷移層を設けている。図 5-3 に示した 35 ペアの AlGaAs DBR の反射率スペクトルの計算結果より、使用した DBR ウェハは反射率の中心波長が  $1530 \text{ nm}$  付近にあり、波長範囲  $1480\text{--}1580 \text{ nm}$  付近に 99% 以上の高反射率帯域を有する。



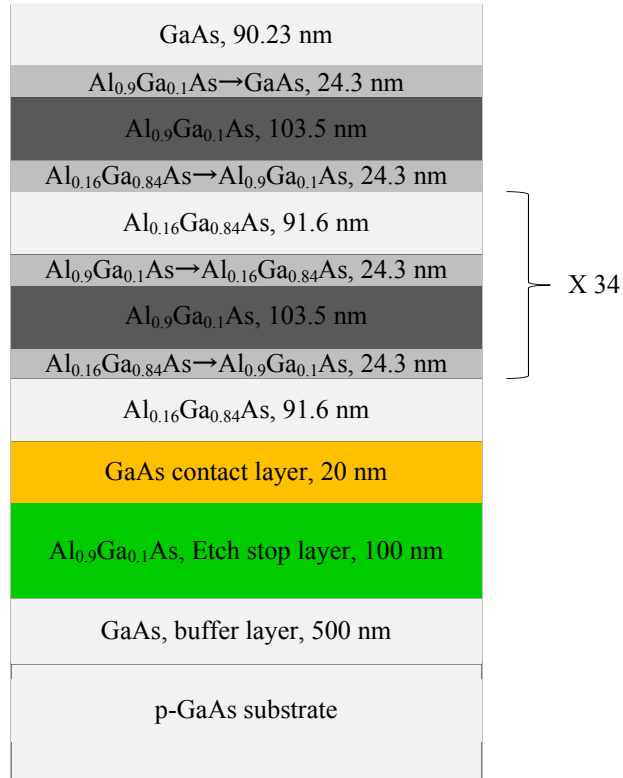


図 5-2 35 ペア AlGaAs DBR ウェハ構造図

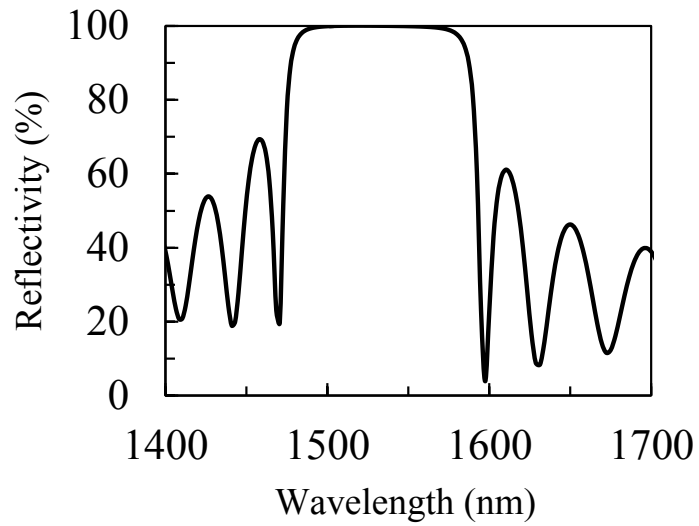


図 5-3 35 ペア AlGaAs DBR ウェハの反射率計算結果

### 5-2-3 活性層ウェハ

図 5-4 に活性層ウェハの構造を示す。各層は MOCVD 法によって InP 基板の上に成長されており、エッチストップ層の上に高屈折率層が  $\text{In}_{0.66}\text{Ga}_{0.34}\text{As}_{0.74}\text{P}_{0.26}$ 、低屈折率層が InP の 2.5 ペアの DBR が位置する。その上に 9 層の QWs ( $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.82}\text{P}_{0.18}$ )、障壁層 ( $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.48}\text{P}_{0.52}$ ) およびスペーサ層 ( $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.48}\text{P}_{0.52}$ ) が設けられ、最上層に InP 層がある。QWs の格子不整合度は+1%の圧縮歪を施してあるが、それ以外の InGaAsP 層の格子整合している。QWs に歪を加えることによって、キャリアの有効質量を変えることができ、小さなキャリア密度でも反転分布を実現することができるため、低発振閾値に繋がる[10]。

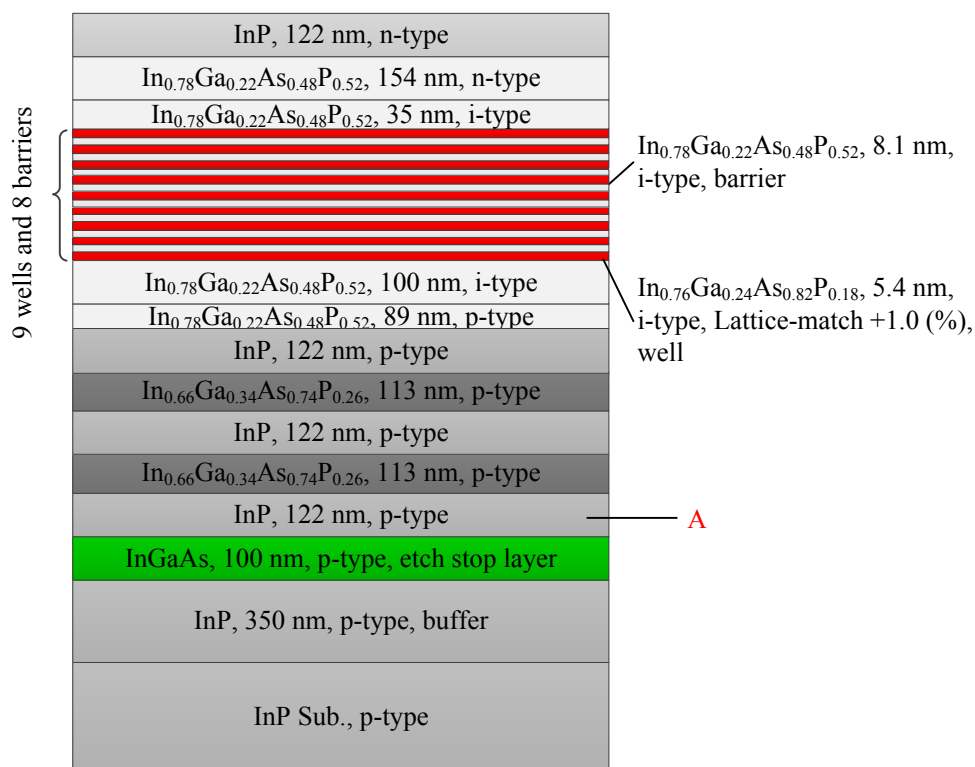


図 5-4 活性層ウェハ構造図

図 5-5(a) に活性層ウェハのフォトルミネセンス (PL) スペクトルの温度依存性を示す。また、挿入図には 300 K における PL スペクトルを示す。図 5-5(b) はピーク波長の温度依存性を示している。300 K でのピーク波長は 1550 nm であり、短波長側へは 1300 nm、長波長側へは 1600 nm 付近までスペクトルが広がっている。また、低温になるにつれて発光強度は強くなり、ピーク波長は短波長側へシフトする。そのシフト量は  $\sim 0.5$  nm/K である。なお、PL スペクトルはクライオスタットの中に未加工の活性層ウェハを搬入し、

液体窒素により冷却して光励起を行った。

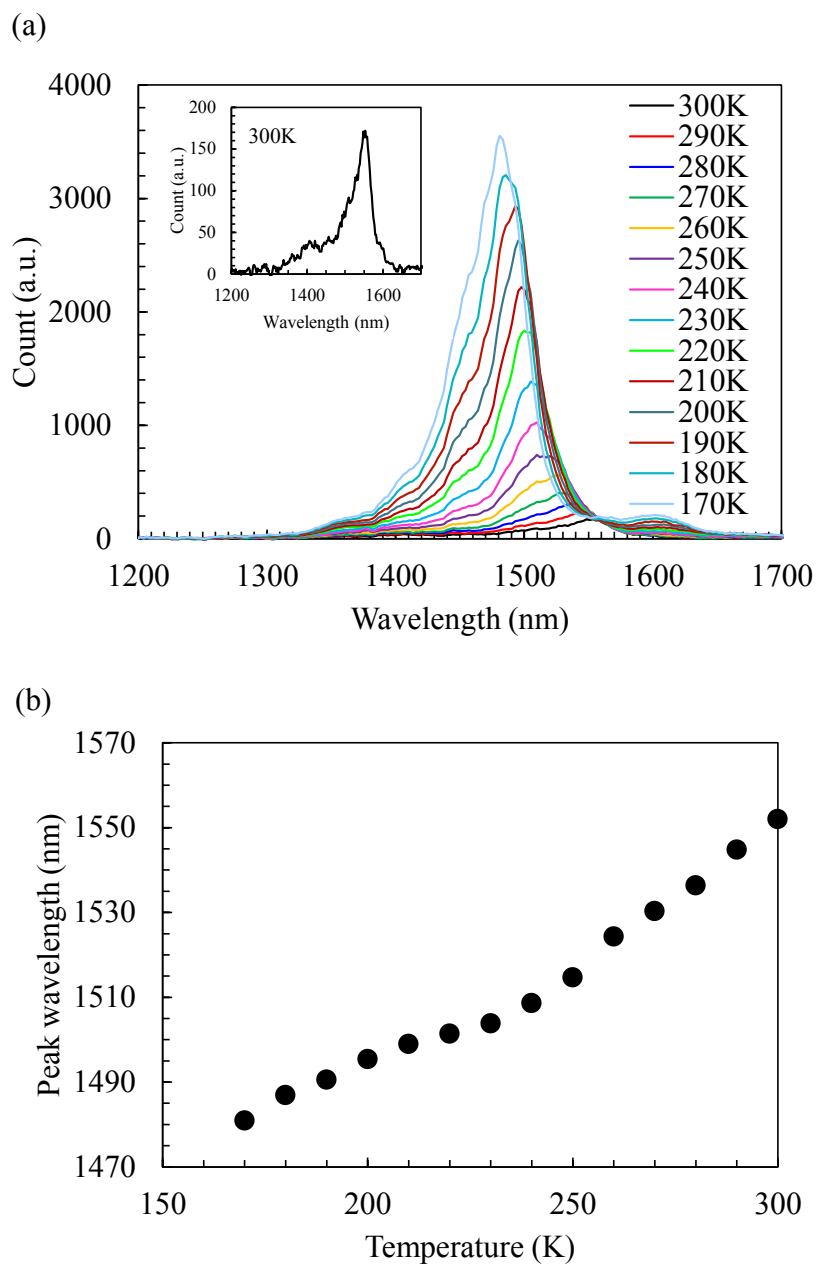


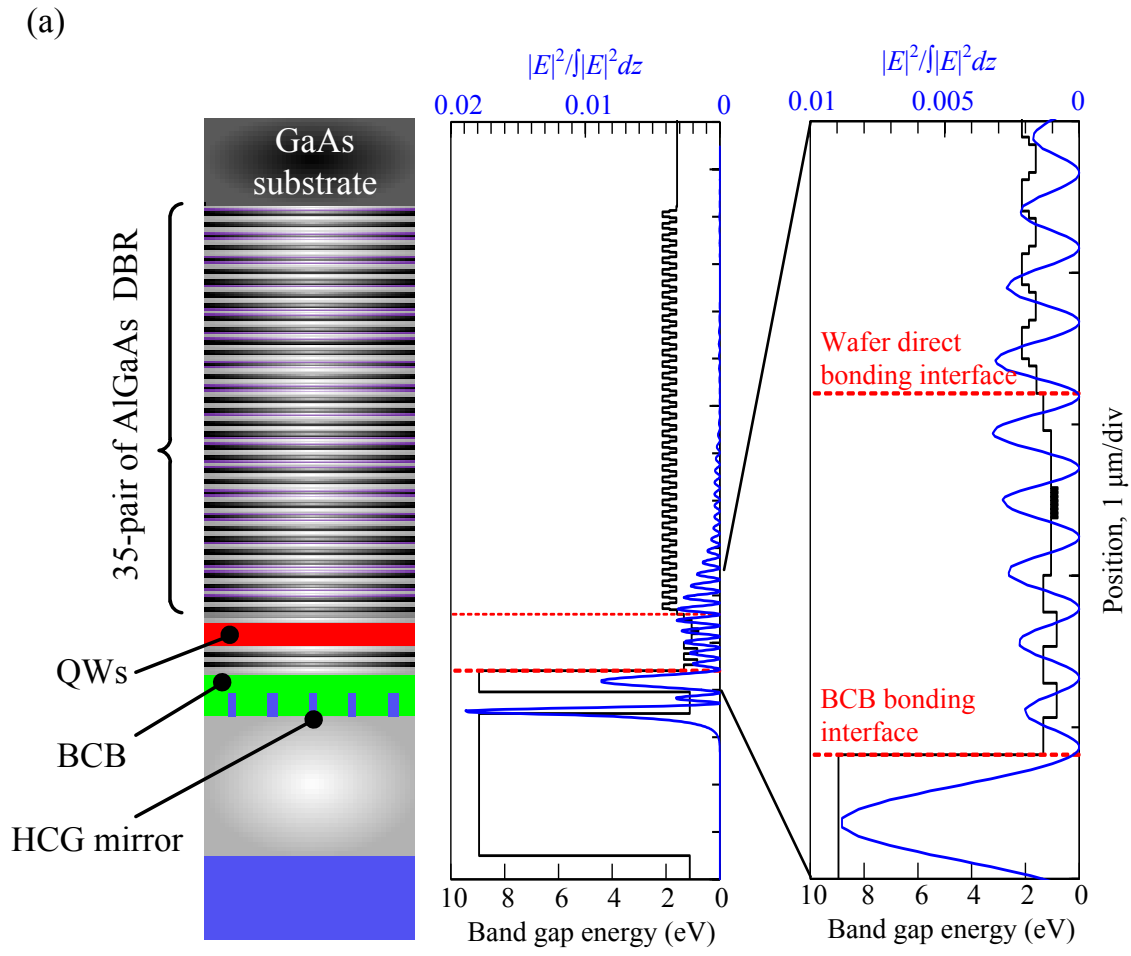
図 5-5 (a)活性層ウェハの PL スペクトルの温度依存性および、(b)ピーク波長の温度依存性

図 5-4 に示したように活性層下側の DBR のペア数は 2.5 ペアとして設計・作製されているが、作製したデバイスでは 2 ペアの InP/InGaAsP DBR とした(図 5-1)。図 5-6 に DBR のペア数が 2.5 ペアおよび 2 ペアの場合の共振器中の光強度分布の計算結果およびバンドギャップエネルギー分布を示す。なお、共振波長を 1550 nm にするため、

BCB の膜厚をそれぞれ 450、650nm とした。また、光強度分布は共振器内の全光強度で規格化し、縦軸範囲をそろえている。本来、この活性層ウェハは、両側に AlGaAs DBR の GaAs 層を貼り合わせて VCSEL を形成するために設計されたものである。この場合、図 5-4 中の A で示した InP 層は接着される GaAs 層に対して屈折率が小さくなり、GaAs 層への入射光と GaAs 層からの反射光が同位相になる。一方、InP 層に BCB が接する場合、InP 層の屈折率の方が大きくなり、BCB への入射光と BCB からの反射光が逆位相になる。すると、InP/InGaAsP DBR のペア数を 2.5 ペアの場合、図 5-6(a) に示すように QWs 付近の光強度は 0.003 程度になる。そこで、入射光と BCB からの反射光の位相をそろえるために InP を除去すると図 5-6(b) に示すように QWs 付近の光強度は 0.006 程度になる。なお、波長 1550 nm における屈折率を InP = 3.17、GaAs = 3.37、BCB = 1.55 とした。

一般的に VCSEL では利得が得られる QWs 部分で光強度が強くなるように設計される。したがって、本デバイスでは QWs により強い光が局在する構造が良いと判断し、図 5-4 中の A で示した InP 層を除去して InP/InGaAsP DBR のペア数を 2 ペアとした。この作製方法については 5-4 で述べる。

また、図 5-6 の赤破線でウェハ直接ボンディングおよび BCB ボンディング界面を示している。DBR のペア数がいずれの場合でも、ウェハ直接ボンディング界面での光強度は節になる。つまり、ボンディング界面に空隙や荒れが発生しても光損失は生じない。一方、BCB ボンディング界面の光強度は、DBR のペア数が 2.5 ペアの場合は節に、2 ペアの場合は腹になる。したがって、DBR のペア数が 2 ペアの場合、ボンディング界面の状態によっては光損失が発生すると考えられる。しかし、BCB ボンディングが正常に行われれば非常に平坦な界面が得られるため、大きな光損失は生じないと考えられる。



2.5 pairs DBR, BCB = 450 nm

(b)

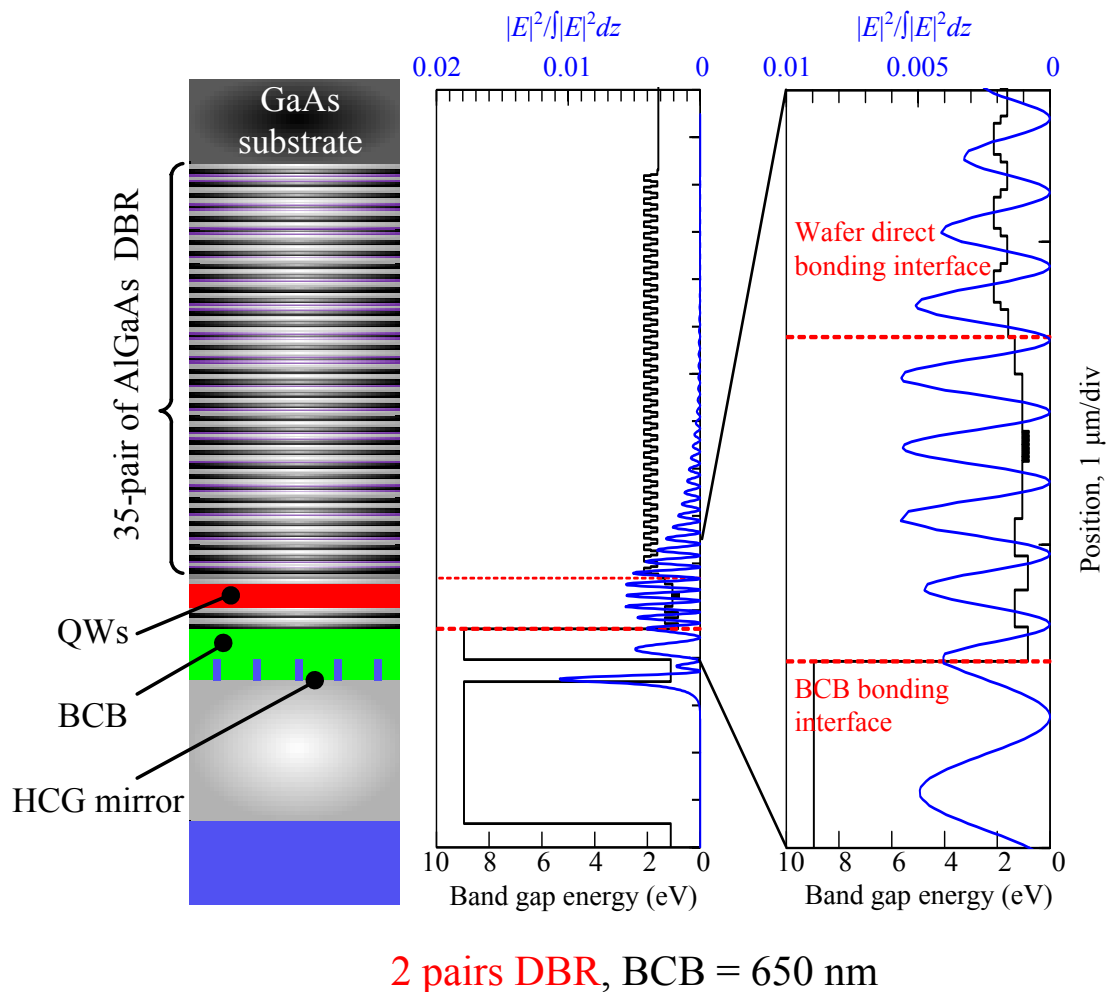


図 5-6 DBR のペア数を(a)2.5 ペアおよび(b)2 ペアにした場合の光強度分布およびバンドギャップエネルギー分布

#### 5-2-4 偏光無依存 HCG の反射率特性

波長 1550 nm 付近に広帯域で高反射率を有する偏光無依存 HCG の構造を決定するために、3次元 FDTD 法を用いた数値解析を行った。図 5-7 に反射率計算に用いた構造を示す。図 5-1 に示した HCG-VCSEL では活性層下側の反射鏡は 2 ペアの InP/InGaAsP DBR も含まれるため、BCB 上に DBR を配置した構造で解析した。SiO<sub>2</sub> の厚さは 3000 nm、Si、SiO<sub>2</sub> および BCB の屈折率はそれぞれ、3.48、1.48 および

1.55[11]とした。最適化の対象とする構造パラメータは、格子の周期  $A$ 、Si の厚さ  $T_{Si}$  および格子の幅  $W$  である。なお、格子の形状は矩形とし、BCB の厚さ  $T_{BCB}$  は共振波長が 1550 nm になる 650 nm とした。境界条件として  $z$  方向には PML、 $x$  および  $y$  方向には HCG のユニットセルを形成するように PBC を設定した。図 5-7 では PML を白線、PBC を赤線で示している。波長 1550 nm 付近に広帯域で高反射率を有する構造パラメータを表 5-1 に示し、そのときの反射率スペクトルを図 5-8 に示す。波長 1450 nm と 1650 nm 付近で 99% 程度の反射率が得られているが、1550 nm 付近では 98% 程度まで反射率が低下している。 $T_{BCB}$  を増加および減少させると、高反射率帯のディップは長波および短波側へ推移する。したがって、このディップは HCG と DBR 間での干渉が原因だと考えられる。

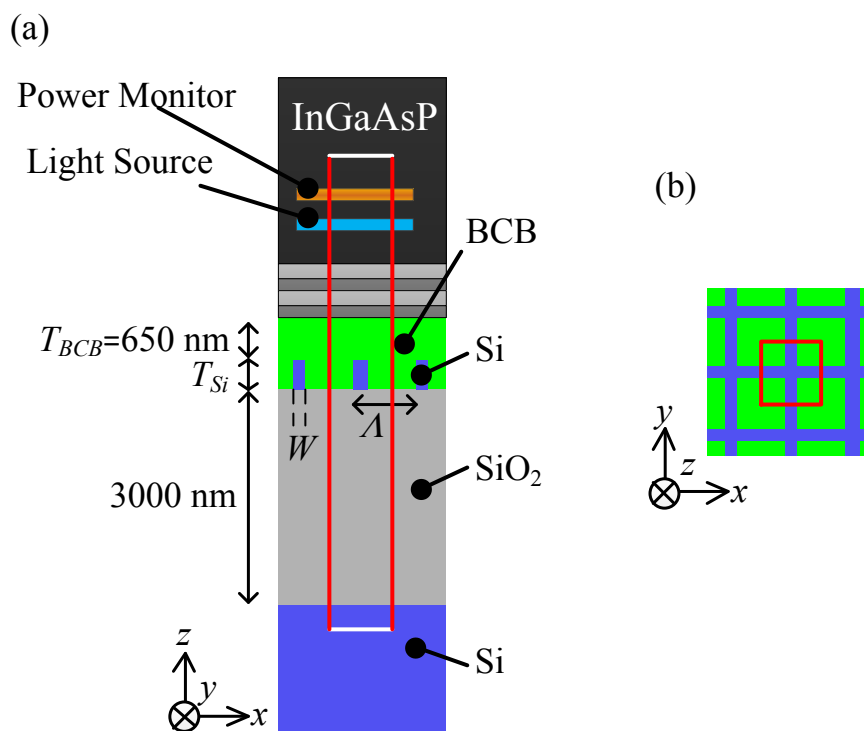


図 5-7 数値解析に用いた偏光無依存 HCG 構造、(a) $x$ - $z$  平面、(b)Si 層中央での  $x$ - $y$  平面

表 5-1 偏光無依存 HCG 構造パラメータ

$A$ (nm)	$T_{Si}$ (nm)	$W$ (nm)	$T_{BCB}$
860	460	181	650

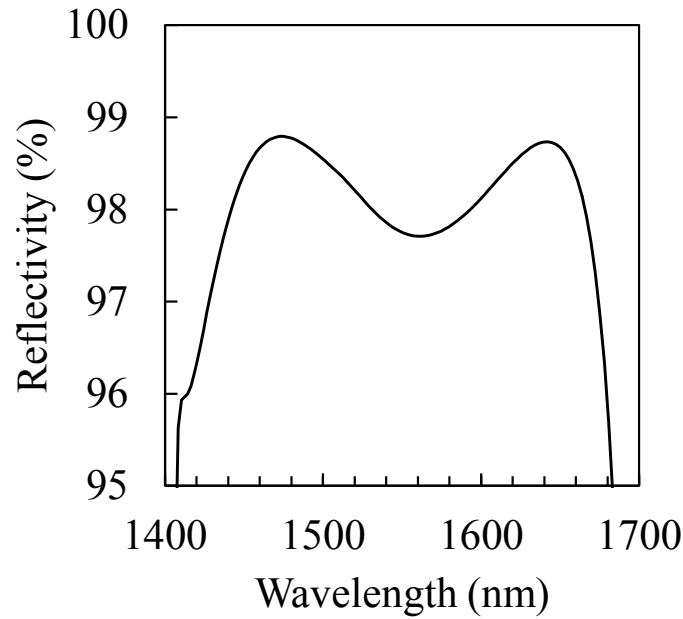


図 5-8 2 ペア InP/InGaAsP DBR/BCB/偏光無依存 HCG の反射率スペクトル

### 5-2-5 BCB 膜厚と共振波長

一般的な VCSEL では活性層および DBR を一括して結晶成長でき、各層の膜厚もナノメートルオーダーで制御が可能である。そのため、共振器の共振波長は、ウェハが成長された段階で概ね決定される。一方、図 5-1 で示した HCG-VCSEL では 3 枚のウェハを接着して共振器を形成する。この共振器において主に反射鏡として機能するのは 35 ペアの AlGaAs DBR と HCG である。したがって、共振器内に BCB が含まれ、BCB 膜厚の変化にともない共振器長および共振波長も変化する。BCB はスピンのコーティングで基板上に塗布できるため、その膜厚は回転数や溶液の希釈率、あるいは BCB ボンディング時の圧力によって変えられ、得られる膜厚の自由度は高い。しかし、言い換えると複数の要因によって決められる BCB 膜厚のナノメートルオーダーでの正確な制御は非常に困難であることを意味する。つまり、一般的な VCSEL に比べて BCB ボンディングを用いた HCG-VCSEL における共振波長の制御性は悪く、如何に BCB 膜厚の制御性を向上させるかが課題のひとつだと考える。

図 5-9 に BCB 膜厚に対する共振波長の変化を示す。BCB 膜厚の  $\pm 100$  nm の変化に対して、共振波長は  $\pm 25$  nm 程度変化する。使用した活性層ウェハの室温における PL ピーク波長は図 5-5 に示したように 1550 nm であり、DBR の反射率は図 5-3 に示したように 1480 nm よりも短波長側で低下する。したがって、共振波長が概ね 1480-



1550 nm の範囲内でなければレーザー発振に至らないと考えられるため、BCB の膜厚を 450-650 nm の範囲で制御しなければならない。

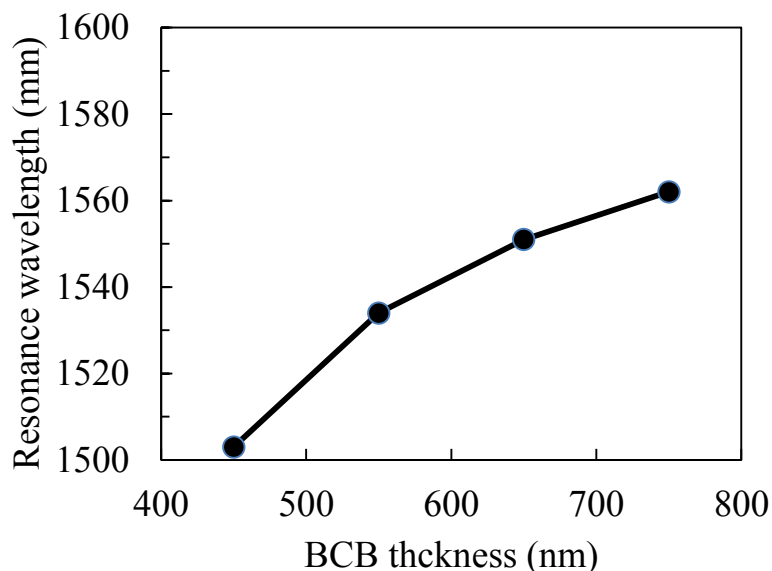


図 5-9 BCB 膜厚と共振波長の関係

### 5-3 BCB 埋め込み偏光無依存 HCG の反射率

作製したデバイスでは、HCG を作製した SOI 基板の上に BCB をスピコートするため、図 5-1 に示したように格子間が BCB で埋まる。筆者が所属する研究室では、これまでに格子間が空気である偏光無依存 HCG (Air-BCB) 構造の最適化は行われているが[6]、格子間の屈折率差が変化するため BCB で埋まった偏光無依存 HCG (BCB-HCG) の最適な構造は変化すると考えられる。そこで、まずは 3 次元 FDTD 法を用いて広帯域で高反射率が得られるように構造の最適化を行った。また、BCB-HCG の反射率および偏光依存性を測定した。

#### 5-3-1 BCB-HCG の反射率特性

5-2-4 では活性層下側の反射率を検討するため、BCB 上に半導体がある構造で解析した。しかし、ここでは HCG 本来の反射率特性を測定することを目的としたため、図 5-10 に示すように DBR が無い構造で解析した。SiO<sub>2</sub> の厚さは 3000 nm、Si および SiO<sub>2</sub> の屈折率はそれぞれ、3.48 および 1.48 とした。最適化の対象とする構造パラメー

タは、格子の周期  $A$ 、Si の厚さ  $T_{Si}$ 、格子の幅  $W$  および埋め込み材料の屈折率  $n_{em}$  とした。なお、 $n_{em}$  は空気の場合を 1、BCB の場合を 1.55 とした。また、格子断面の形状は矩形とし、境界条件として  $z$  方向には PML、 $x$  および  $y$  方向には HCG のユニットセルを形成するように PBC を設定した。図 5-10 では PML を白線、PBC を赤線で示している。波長 1550 nm 付近に広帯域で高反射率を有する構造パラメータを表 5-2 に示し、そのときの反射率スペクトルおよび透過率スペクトルを図 5-11 に示す。赤線で Air-HCG、黒線で BCB-HCG を示しており、実線で反射率、破線で透過率スペクトルを示している。反射率が 99% よりも高い反射率帯域は、Air-HCG では 95 nm、BCB-HCG では、260 nm である。また、99.7% よりも高い反射率帯域は、Air-HCG では 67 nm、BCB-HCG では、170 nm である。つまり、BCB-HCG では Air-HCG よりも 2.5 倍程度広い反射率帯域が得られることがわかった。したがって、HCG の格子間が BCB で埋まった BCB-HCG も VCSEL の反射鏡として適用できると考えた。

HCG では、入射波が面内の放射モードに結合したときに生じる導波モード共鳴により、共鳴波長付近では高反射率が得られる。回折された入射波が複数の放射モードを励起し、その共鳴波長が近い場合に高反射率帯がつながり、帯域が広がる[12]。図 5-11 の透過率スペクトルでは共鳴波長で鋭いディップが生じている。BCB-HCG では 100 nm 程度ずつ離れた 3 本のディップ、Air-HCG では 30 nm 離れた 2 本のディップが寄与して高反射率帯域を形成している。Air-HCG 構造のパラメータを表 5-2 に示した値の  $\pm 20\%$  の範囲で変化させたが、高反射率帯域が 99% よりも高い反射率が 95 nm 以上(図 5-11)で得られる構造は見つけれなかった。しかし、図 5-11 よりも広帯域な特性が得られる構造が有る可能性も否定できず、今後の研究課題のひとつだと考える。

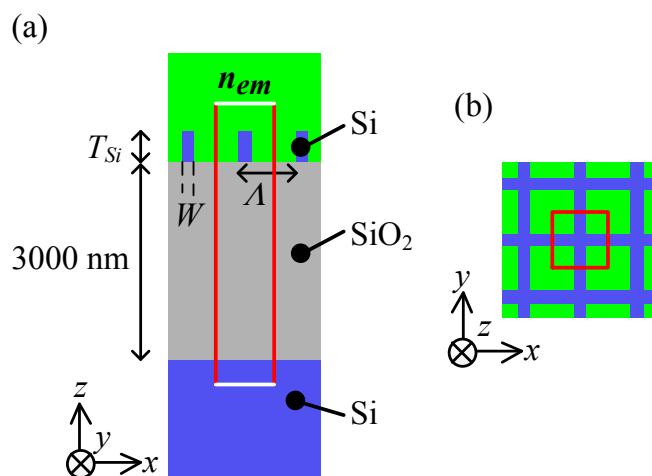


図 5-10 反射率計算に用いた偏光無依存 HCG 構造、(a)x-z 平面、(b)Si 層中央での x-y 平面

表 5-2 Air-および BCB-HCG 構造パラメータ

	$\Lambda$ (nm)	$T_{Si}$ (nm)	$W$ (nm)	$n_{em}$
Air-HCG	906	415	278	1
BCB-HCG	853	466	178	1.55

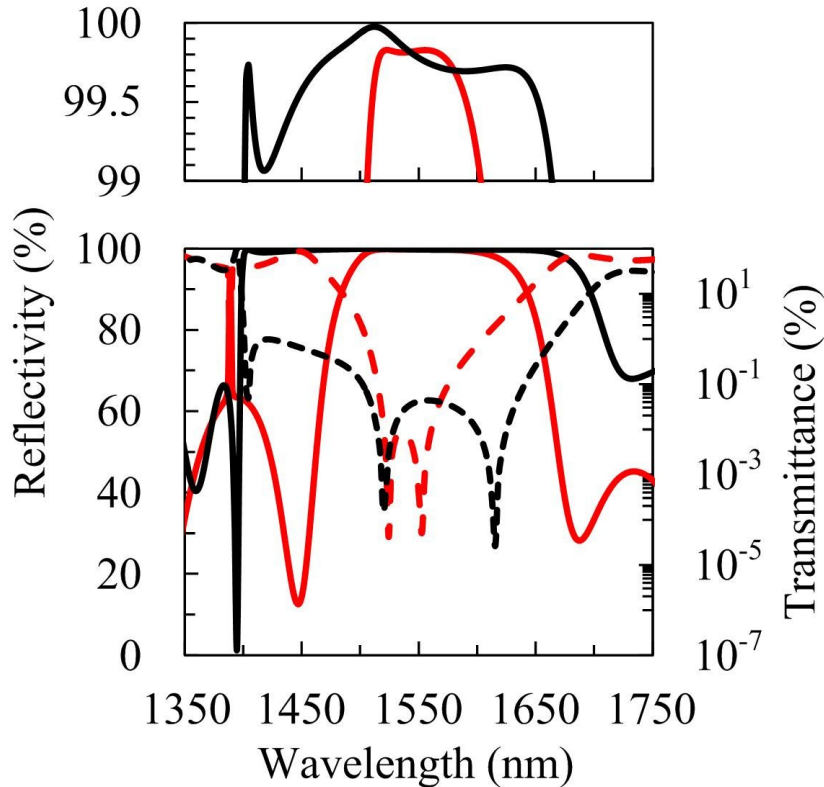


図 5-11 最適化した構造の反射率および透過率スペクトル。赤線で Air-BCB、黒線で BCB-HCG を示しており、実線で反射率、破線で透過率スペクトルを示している。

### 5-3-2 BCB-HCG の反射率測定

次に、偏光無依存 BCB-HCG を作製し、反射率スペクトルを測定した。図 5-12 に作製した HCG の SEM 画像を示す。図 5-12(a)は作製した BCB 塗布前の HCG の斜め上からの画像、(b)は BCB を HCG 上にスピコート、キュアした後にへき開した断面の画像、(c)は(b)の拡大図、(d)は(c)から読み取った HCG の形状および寸法を示している。なお、図 5-12(b)および(c)の構造断面の様子は鮮明な SEM 観察を行うために成

膜した Au 薄膜によるものである。また、Si と SiO<sub>2</sub> の界面を鮮明にするために、BHF を用いて SiO<sub>2</sub> のみを選択エッチングした。図 5-12(b)および(c)より、格子間が完全に BCB で埋まっていることが確認できる。Si の上面から BCB 表面までの距離は 550 nm であった。

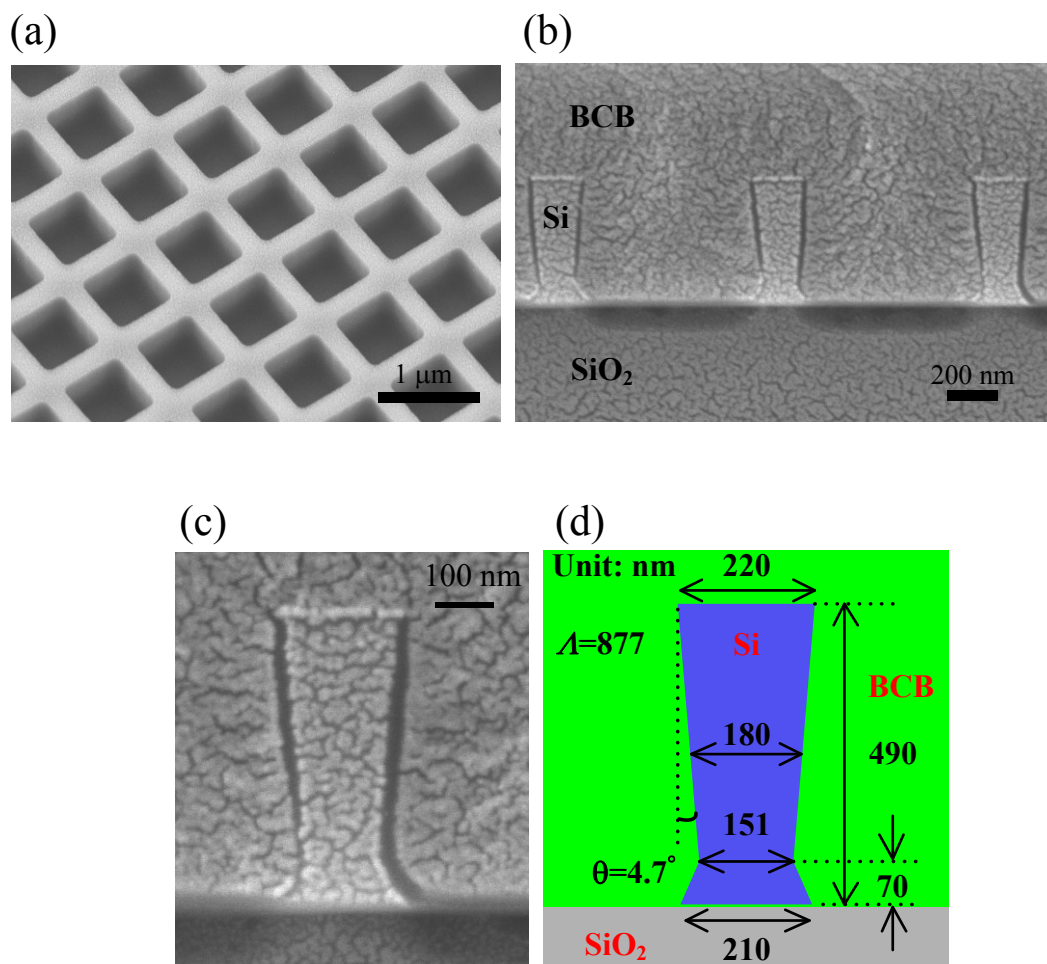


図 5-12 (a) 作製した HCG を斜め上からの画像、(b) BCB を HCG 上にスピコート、キュアした後にへき開した断面の画像、(c) (b)の拡大図、(d) (c)から読み取った HCG の形状および寸法

図 5-13 に BCB-HCG の反射率測定系を示す。入射光源には白熱電球 (6V2AGB-4、OLYMPUS)を用いて、長波長透過フィルタ(LWPF)により 680 nm 以下の波長成分を遮断した。光ファイバから出た光を平行光にした後、アイリスで光束径を 3 mm に絞った。その後、偏光子で HCG への入射偏光方向を規定し、300 μm 角の領域に作製した HCG へ光束径が 180 μm 程度になるように集光した。HCG では入射角が基板に対して垂直方向から 2°傾くと反射率が 1%以上低下するため[13]、本測定

では入射光の集光角が  $0.6^\circ$  になるように測定系を構築した。HCG からの反射光は InGaAs アレイ分光器 (NQ512-2.2、Ocean Optics、波長分解能:  $5\text{ nm}$ ) を用いて測定した。サンプルホルダには回転機構が設けられており、ホルダを回転させることで HCG への入射偏光方向を変化できる。HCG の反射率は、波長  $1300\text{--}1800\text{ nm}$  の範囲で高反射率 ( $99.5\%$ ) を有する誘電体多層膜反射鏡からの反射パワーに対する HCG からの反射パワーの比として定義した。

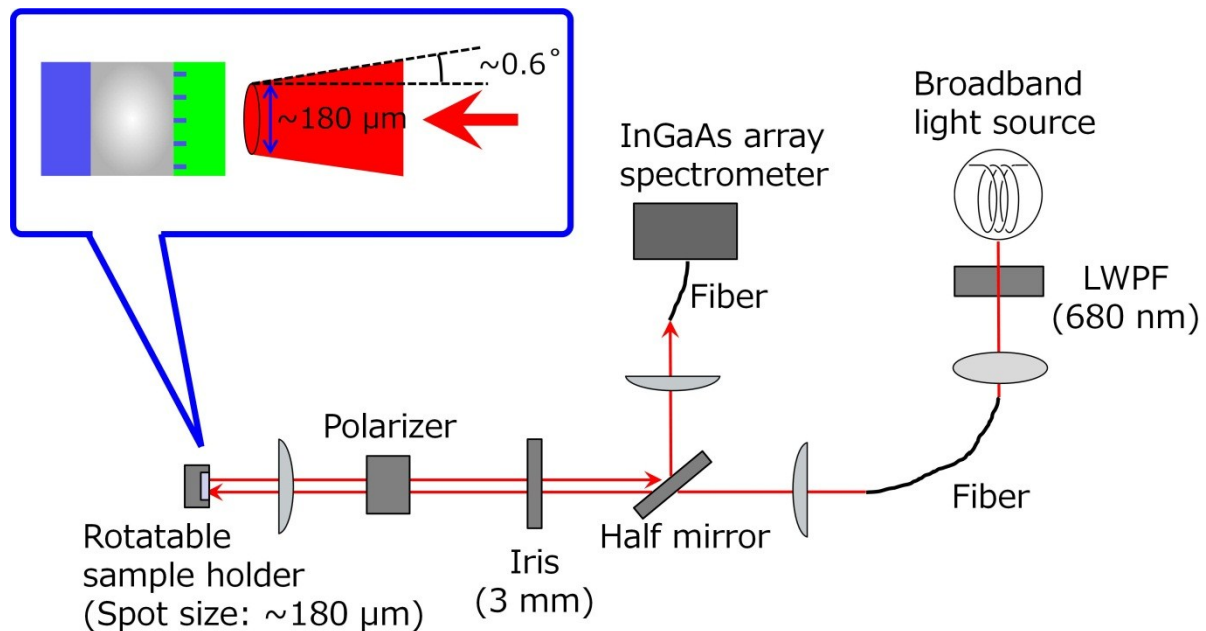


図 5-13 BCB-HCG の反射率測定系

図 5-14(a) に HCG を  $15^\circ$  刻みで回転させて測定した反射率スペクトルを実線で示している。また、図 5-12(d) の構造を用いた計算結果を赤破線で示している。いずれの入射偏光方向においてもよく一致したスペクトルが得られており、計算結果ともよく一致する。なお、スペクトル測定では測定系のアライメントの誤差を平均化するために同様の測定を 10 回行い、得られたスペクトルを平均した。反射率を求めた数値計算では図 5-10 に示したように PBC を用いて基板面内方向には無限に続く構造を考えた。反射率測定においては HCG 領域が有限であるにもかかわらず、計算結果とよく一致した結果が得られたのは、HCG 領域 ( $300\text{ }\mu\text{m}$  角) よりも比較的小さなビーム径 ( $\phi 180\text{ }\mu\text{m}$ ) を適用したためだと考えられる。実測したスペクトルでは測定系による干渉が原因と考えられるリップルが生じているが、すべての入射偏光方向に対して  $99\%$  程度の反射率帯域が  $1490\text{--}1690\text{ nm}$  の  $200\text{ nm}$  の範囲で得られた。図 5-14(a) の計算結果は図 5-11 の結果よりも長波長側に推移しており、一致しない。図 5-11 では矩形の格子を扱ったが、

図 5-12(b)-(d)に示したように実際に作製された格子は側面の傾斜や裾の広がりが生じている。この形状の差異が反射率スペクトルの推移の原因だと考えられる。図 5-14(b)には波長 1500、1550 および 1600 nm における反射率の偏光依存性を示している。いずれの波長においても偏光依存性は±1%以内である。このわずかな反射率の変動は光学系のアライメントの誤差や測定系による干渉が原因だと考えられる。

上記の反射率測定は本研究室の間嶋翔太氏の協力を得て行われた。

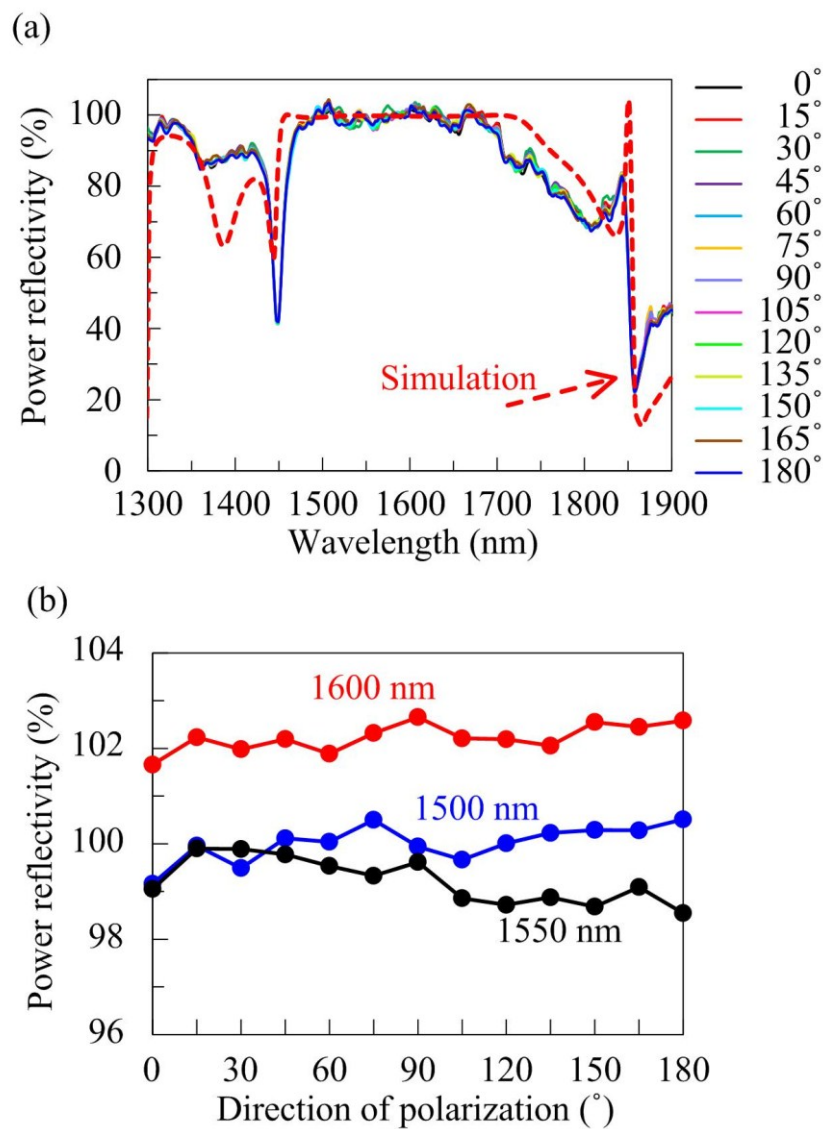


図 5-14 (a)BCB-HCG の反射率スペクトル測定結果および 3 次元 FDTD 法によりもとめた計算結果、(b) BCB-HCG の反射率の偏光依存性

## 5-4 HCG-VCSEL の作製プロセス

HCG-VCSEL の作製プロセスは主に 3 つに分けられる。1 つ目はウェハ直接ボンディングを用いた VCSEL 共振器上側の作製、2 つ目は電子線描画および RIE を用いた SOI 基板上への偏光無依存 HCG の作製、3 つ目はそれらを BCB ボンディングにより貼り合わせて VCSEL 共振器を形成するプロセスである。以下で各作製プロセスについて述べる。図 5-15 には図式化した HCG-VCSEL 作製プロセスフローを示す。

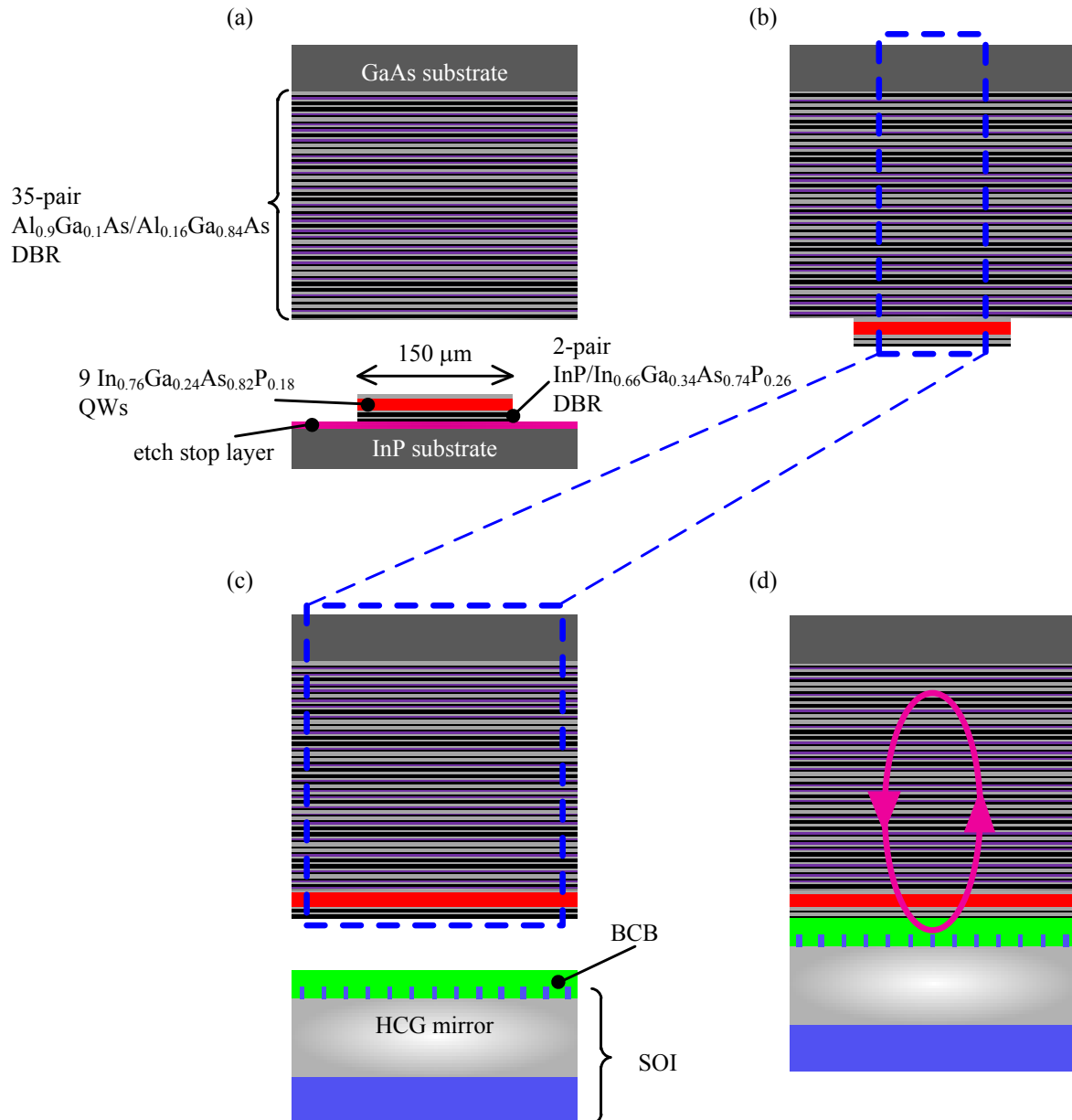


図 5-15 HCH-VCSEL の作製フロー、(a)InP 基板上への幅 150 μm 角、高さ 1.2 μm のメサ加工、(b)AlGaAs DBR と活性層のウェハ直接ボンディング、(c)SOI 基板上に作製した HCG への BCB 塗布、(d)HCG と活性層の BCB ボンディング

## A. 活性層と DBR のウェハ直接ボンディング

### A-1) 基板洗浄

5 mm 角にへき開した DBR を含む厚さ~615  $\mu\text{m}$  の GaAs ウェハ(以下、DBR ウェハ)と、4 mm 角にへき開した活性層を含む厚さ~350  $\mu\text{m}$  の InP ウェハ(以下、活性層ウェハ)に対して、100°C、10 分間のオゾンクリーニングを行いウェハ表面に付着した有機不純物を除去する。その後、脱脂、金属イオン除去、酸化膜除去効果を持つアルカリ半導体洗浄液(セミコクリーン 23、フルウチ化学株式会社)および純水による 1 分間の洗浄を行う。

### A-2) メサ加工

活性層ウェハ上の活性層および 2.5 ペアの InP/InGaAsP DBR にメサを加工する。ネガ型のフォトリソレジスト(ZPN1150-90、日本ゼオン株式会社)をスピコートし、プリベークを行った後、図 5-16 に示すフォトマスク(180  $\mu\text{m}$  角、400  $\mu\text{m}$  周期)およびコンタクトアライナ(MA-10、ミカサ株式会社)を用いて露光する。ポストエクスポージャベーク後、現像液(トクソーSD-1、株式会社トクヤマ)を用いて現像、純水洗浄する。最後にポストベークを行う。表 5-3 にフォトリソグラフィ条件をまとめる。

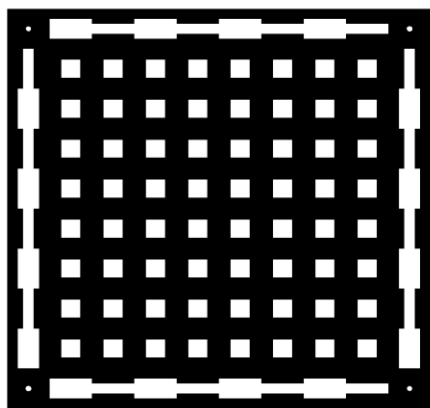


図 5-16 活性層ウェハへのメサ加工用フォトマスク。黒色部は遮光され、白色部が露光される。

表 5-3 活性層ウェハへのメサ加工用フォトリソグラフィ条件

ZPN spin-coating	5000 rpm, 60 s
Pre bake	115°C, 2 min
Exposure	15s
Post exposure bake	110°C, 1 min
Developing	1 min 30 sec
post bake	90°C, 5 min



次に、InGaAsP に対しては  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=3:1:1$ 、InP に対しては  $\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4=5:1$  の混合エッチング溶液を用いて、DBR および活性層をエッチストップ層まで一層ずつ選択エッチングする(図 5-15(a))。DBR は 1-2 秒でエッチングでき、活性層はおよそ 90 秒でエッチングできる。なお、各層がエッチングできたことは光学顕微鏡観察による表面の色の变化から判断できる。また、サイドエッチングが生じるため、メサ加工終了後のメサ径は  $150\ \mu\text{m}$  程度になる。メサ加工終了後の光学顕微鏡画像を図 5-17 に示す。

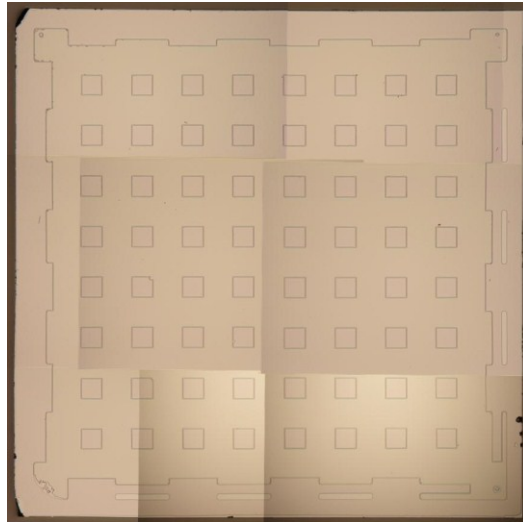


図 5-17 メサ加工終了後の光学顕微鏡画像

### A-3) ウェハ直接ボンディング

2-4-1 で述べたようにウェハ直接ボンディングでは表面に OH 基を形成する必要があるため、薬品による表面処理を行う。まず、両基板に対して、 $100^\circ\text{C}$ 、10 分間のオゾンクリーニングを行い、ウェハ表面の有機不純物を除去する。アルカリ半導体洗浄液に 5 分間浸漬し、純水でリンスした後、希釈フッ酸 (BHF) の中に 5 分間浸漬する。1 次アンモニア水で BHF をリンスした後、2 次アンモニア水中で 5 分間浸漬する。その後、2 次アンモニア水中で図 5-18 に示すウェハ直接ボンディング位置合わせ用治具 (SUS304 製) の上に DBR ウェハを配置し、活性層ウェハ表面を DBR ウェハ表面に合わせるように裏返して配置する。2 次アンモニア水から治具ごとサンプルを取り出した後、実体顕微鏡で観察しながら、両基板の角が合うように位置合わせする。治具から両ウェハを取り出し、 $3.5\ \text{kg}$  の重り ( $100\ \text{kg}/\text{cm}^2$  相当) を用いて 5 分間加圧する。その後、図 5-19 に示すウェハ直接ボンディング用治具 (カーボン製) の下側治具上にサンプルを配置する。続いてサンプルの上に蒲鉾状治具の平面側を乗せ、上側治具で固定する。なお、蒲鉾状治具は上下の治具の平行度が多少悪くても基板に垂直な方向に加圧する役割

を担う。トルクレンチを用いて 8 cN・m (260 kg/cm<sup>2</sup> 相当)の加重で治具を固定した後、赤外線ランプ加熱装置(QHC-P610CP、アルバック理工株式会社)へ搬入する。

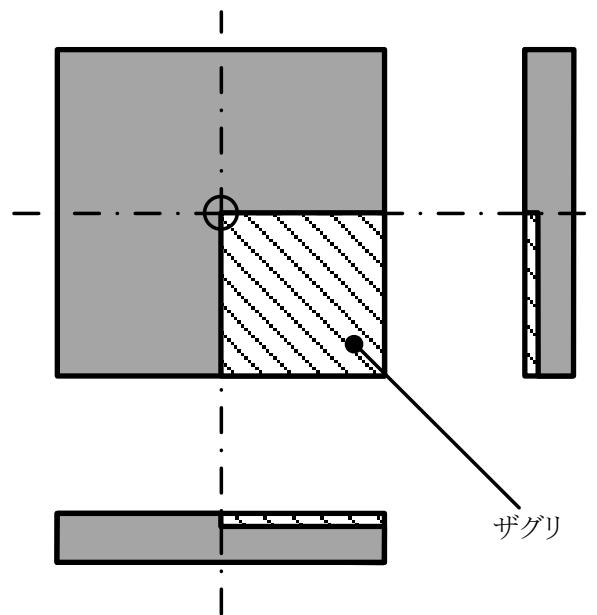


図 5-18 ウェハ直接ボンディング位置合わせ用治具



図 5-19 ウェハ直接ボンディング用治具

赤外線ランプ加熱装置内を真空排気後、120°C で 20 分間のベーキングを行う。その後、炉内を水素と窒素の混合ガス(H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=4:96)で置換し、1200°C/h のレートで 600°C まで昇温し、その状態を 30 分間保持する。100°C/h のレートで 200°C まで降温した後自然冷却すると、両基板が接着される。

#### A-4) 基板研磨

ウェハ直接ボンディングを終えた時点では活性層下側に InP 基板があるが、VCSEL 共振器を形成するためには InP 基板を除去する必要がある。InP 基板除去には最終的にはウェットエッチングを用いるが、基板が割れない程度 (~150  $\mu\text{m}$ ) まで薄くするにはレートが速く、時間的効率が良い研磨を行う。また、HCG-VCSEL の光励起測定では後述するように効率よくキャリアを励起するために GaAs 基板側から励起光を入射する。基板表面に凹凸があると励起光が散乱されるため、GaAs 基板表面も研磨によって鏡面にする必要がある。

まず、エレクトロソルベント(フルウチ化学株式会社)を用いて InP 基板側を研磨用治具に固定し、GaAs 基板を鏡面研磨剤 (INSEC FP、株式会社フジミンコーポレーテッド) を用いて 10 分間研磨する。この時の研磨量は 20  $\mu\text{m}$  程度である。研磨終了後、60°C に加熱したエレクトロソルベントによる 10 分間の洗浄を 2 回、および 60°C に加熱したアセトンによる 10 分間の洗浄を行い、メタノールおよび純水洗浄を行う。

次に、GaAs 基板側を研磨用治具に固定し、InP 基板を研磨する。研磨時に基板側面を保護するために基板の周囲に InP のヤトイも同時に配置する(図 5-20)。研磨剤 (A3000、株式会社マルトー) を用いて基板を 150  $\mu\text{m}$  程度まで研磨した後、鏡面研磨剤 (INSEC IPP、株式会社フジミンコーポレーテッド) を用いて 20 分間研磨する。研磨終了後は同様の洗浄工程を行う。

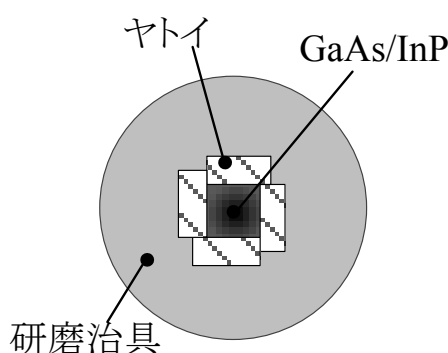


図 5-20 研磨治具へのサンプルおよびヤトイ配置

#### A-5) ボンディング界面観察

図 5-6 に示したようにウェハ直接ボンディングの界面では光強度が弱くなるため、設計上界面での光損失は生じない。しかし、界面に荒れや空隙などがなく、どのように接着されているかを把握することは重要である。そこで、ボンディング界面の様子を観察した。発光波長 1.3  $\mu\text{m}$  の発光ダイオード(LED)から出た光をサンプル表面に集光、透過させる。その透過光をビジコンカメラで観察した。

図 5-21 にボンディング界面画像を示す。図 5-21(a)は界面が一様なコントラストで見えるが、図 5-21(b)はコントラストが不均一であり、図 5-21(c)はメサ外側にも黒い模様が見える。図 5-21(a)はボンディング界面が良好に接着されているが、図 5-21(b)、(c)は接着されていないことを示している。

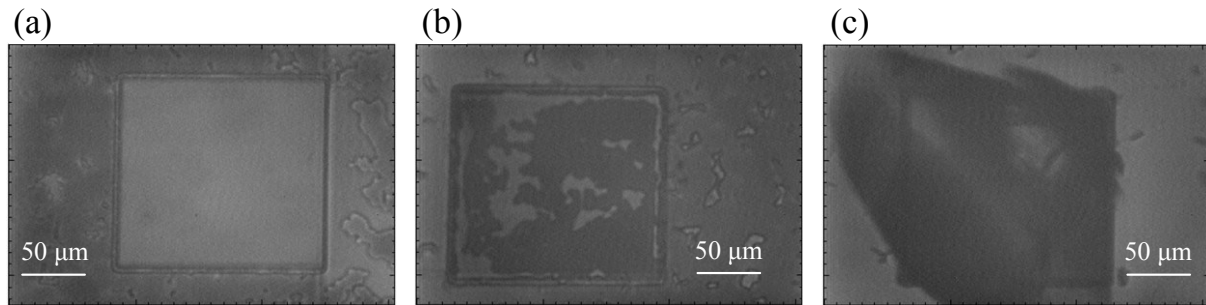


図 5-21 ボンディング界面画像、(a)良好、(b、c)不良な接着界面

#### A-6) InP 基板除去

A-4)において厚さ 150  $\mu\text{m}$  まで研磨した InP 基板をウェットエッチングによりエッチストップ層まで除去する。HCl:H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>=5:1 の混合エッチング溶液を用いておよそ 30 分間のエッチングにより基板を除去し、エッチストップ層を露出した(エッチングレート:~5  $\mu\text{m}/\text{min}$ )。そして、エッチストップ層を H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O=6:1:100 の混合エッチング溶液を用いて除去した後、5-2-3 で述べた様に共振器の位相調整をするために HCl:H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>=5:1 の混合エッチング溶液を用いて InP 層を除去する(図 5-15(b))。図 5-22 に InP 層除去後の光学顕微鏡画像を示す。エッチストップ層除去用のエッチング溶液は AlGaAs DBR もエッチングするため、むらのある表面になるが、共振器には関係ない領域であるためデバイス特性に影響は与えないと考えられる。また、ウェハ直接ボンディングによる接着界面が良好でなかった箇所は、メサの剥離やメサ周囲に荒れが生じる。

以上の工程で活性層および上側反射鏡の加工は完了となる。なお、一般的な VCSEL において光を閉じ込める役割を担う上部 DBR に形成される数  $\mu\text{m}$  程度のメサ構造を形成していない。これは、本デバイスでは発振横モードの制御を考慮せず、光励起によるレーザ発振を主たる目的としたため、ならびに HCG 上に数  $\mu\text{m}$  のメサを形成するには高精度な位置合わせや複雑な作製工程の追加が必要になるためである。

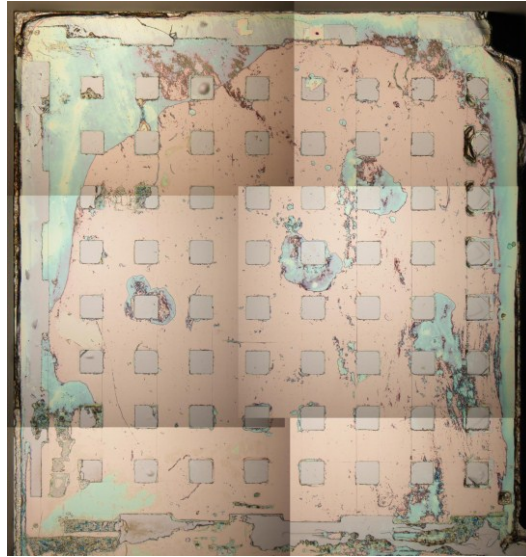


図 5-22 InP 層除去後の光学顕微鏡画像

## B. 偏光無依存 HCG 作製

### B-1) Si 層膜厚測定および RIE エッチング

5-2-4 で述べたように広帯域で高反射率が得られる HCG の Si 層膜厚は 460 nm である。しかし、所有する SOI の Si 層膜厚は  $600 \pm 30$  nm であるため、所望の膜厚とは一致しない。そこで、HCG 作製工程に取り掛かる前に Si 層をエッチングし、460 nm に合わせる必要がある。

まず、使用する SOI 基板(11 mm 角、厚さ $\sim 600$   $\mu\text{m}$ )の Si 層膜厚を知るために、その基板に接する領域の基板を Si 膜厚観察用として用意する。観察用 SOI 基板の断面 SEM 画像を図 5-23 に示す。ただし、Si 層と SiO<sub>2</sub> 層の境界を明らかにするため、BHF で 2 分間エッチングした。さらに、より明瞭な SEM 観察を行うため Au 薄膜を $\sim 30$  nm 成膜している。SEM 観察結果から初期 Si 膜厚は 590 nm であった。

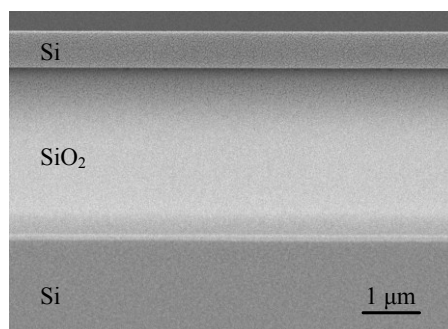


図 5-23 Si 層膜厚観察用 SOI 基板の断面 SEM 画像

次に、Si 層を初期膜厚と所望の膜厚の差分に相当する厚さ 130 nm を RIE によりエッチングした。エッチング条件は表 5-4 に示すようにエッチングガス  $\text{CHF}_3:\text{SF}_6 = 80 \text{ sccm}:5 \text{ sccm}$ 、プロセス圧力 6.0 Pa、RF パワー 50 W である。この条件を構造が無い SOI 基板に適用した場合、エッチングレートは 33 nm/min 程度になることを考慮してエッチングした。

表 5-4 Si 層エッチングの RIE 条件

$\text{CHF}_3$	80 sccm
$\text{SF}_6$	5 sccm
Pressure	6.0 Pa
RF Power	50 W

#### B-2) EB 描画および RIE による HCG 作製

本研究では、EB 描画装置によるポジ型の EB レジスト (ZEP520A) のパターンニングで HCG のエッチングマスクを形成した後、RIE により Si をエッチングした。先行研究では希釈した EB レジスト (ZEP520A:アニソール=5:1) を 3000 rpm で 60 秒間スピコートした後、0.28  $\mu\text{sec}/\text{dot}$  の電子線照射量で露光する条件が最適とされた[15]。そこで、本研究でもこの条件を用いて HCG のパターンニングを行った。ただし、電子線照射量を 0.28  $\mu\text{sec}/\text{dot}$  とした場合、図 5-24 に示すように現像後のレジスト格子幅は CAD で設定した格子幅に比べて 20 nm 程度細くなり、RIE によるサイドエッチングによって (SEM 観察できる上面の) 格子幅はさらに 30 nm 程度細くなる。また、図 5-12 に示したように格子側面は 5°程度傾斜する。これらの関係を考慮して、格子中央の幅が 181 nm になるように CAD には格子幅を設定し、50  $\mu\text{m}$  角の領域 (58 周期分) に HCG パターンを描画した。この 50  $\mu\text{m}$  角の HCG を 100  $\mu\text{m}$  周期で 11 mm 角の SOI 基板の中心 3.6 mm 角に配置した (~1300 個)。そして、現像液 (酢酸ペンチル) で 1 分間の現像後、純水および 2-プロパノールで洗浄し、最後に 120°C で 2 分 30 秒間のベーキングを行った。

格子間の  $\text{SiO}_2$  層が 30 nm 程度エッチングされても反射率特性にはほとんど影響がないが、Si が残った場合は高反射率帯にディップが生じることを計算によって確かめた。そこで、格子間の Si を完全にエッチングするように、格子間の Si のエッチングレートが 31 nm 程度になることを考慮して、表 5-4 に示した条件でエッチングした。RIE 後、100°C、8 分間のオゾンクリーニングを行い、N, N-ジメチルアセトアミドによるレジスト除去、最後に純水洗浄を行った。

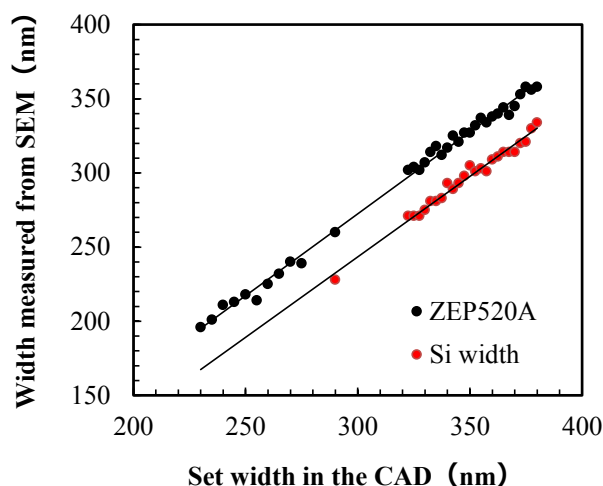


図 5-24 CAD で設定した格子幅、現像後の ZEP520A および RIE 後の格子幅の推移

### C. BCB ボンディング

#### C-1) BCB のスピコーティング

HCG を形成した SOI 基板を 150°C、10 分間のベーキングを行った後、接着増進剤 (AP3000、Dow Chemicals) に続いて BCB (CYCLOTENE 3022-35、Dow Chemicals) を SOI 基板上に表 5-5 の条件でスピコートする。その後、150°C、10 分間のプリベークを行う。

表 5-5 接着増進剤および BCB のスピコート条件

	AP3000	CYCLOTEN 3022-35
Step 1	slope 2 s	slope 5 s
Step 2	300 rpm, 5 s	5000 rpm, 40 s
Step 3	slope 3 s	slope 3 s
Step 4	3000 rpm, 20 s	
Step 5	slope 3 s	

BCB の溶媒にはメシチレンが用いられており[15]、BCB 溶液にメシチレンを追加し、希釈率を変えることで膜厚の調整が可能である[11]。図 5-25 に希釈率に対する、加圧せずにキュアした後の BCB 膜厚を示す。ここでの希釈率は BCB 溶液に対する追加したメシチレンの割合とした。希釈率が大きくなるにつれ、得られる BCB 膜厚が薄くなる。

また、希釈率が小さい、つまり原液に近い場合は、テスト毎のばらつきが大きい。これは、少量のメシチレンを追加して溶液を作製したことによる作製誤差だと考えられる。

治具でサンプルを固定した際の圧力でボンディング後の BCB 膜厚は図 5-25 よりも 3 割程度減少する。そこで、ボンディング後の BCB 膜厚を 550 nm 程度にするため、本プロセスの BCB 溶液の希釈率は 26%とした。

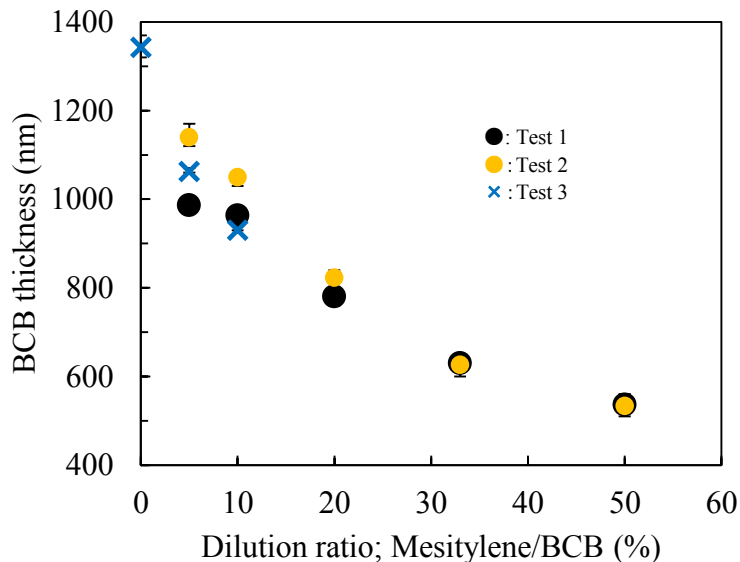


図 5-25 BCB 膜厚の希釈率依存性

### C-2) BCB キュア

11 mm 角の SOI 基板に表 5-5 の条件で BCB をスピコートした場合、基板の中央 6 mm 角程度は、ばらつきが 100 nm 以内の均一な膜が得られるが、基板の周囲 1-2 mm の領域はミクロンオーダーで厚くなる。BCB 膜厚が均一な領域である SOI 基板の中央に A) で作製した活性層および DBR を貼り合わせるため、図 5-26 に示す BCB ボンディング用治具(アルミニウム製)を使用した。治具中央部に 2 段階のザグリが形成されており、一段目のザグリは活性層が接着された DBR ウェハの厚さよりも浅く、2 段目のザグリは SOI 基板と DBR ウェハの厚さの和より浅くなるように設計されている。まず、活性層が接着された DBR ウェハの表面を上側にして一段目のザグリの角に合わせるように配置する。そして、BCB を塗布した SOI 基板を裏返してその角を 2 段目のザグリの角に合わせるように配置する。サンプル上に、上側治具を置き、トルクレンチを用いてボルトを締め、8 cN・m (140 kg/cm<sup>2</sup> 相当)の加重で治具を固定した。次に、窒素置換したアニーリング炉中に置いたサンプルを 110°C/h のレートで 290°C まで昇温し、その状態を 1 時間保持する。その後、自然冷却すると BCB がキュアされ、両基板が接着す



る。

なお、この方法では BCB の膜厚分布が基板面内で 600 nm 程度であり、所望の BCB 膜厚である  $550 \pm 100$  nm が得られる領域は 20%程度である。この大きな膜厚分布は歩留まりの低下の一因であるため、膜厚のばらつきを低減させることが今後の課題の一つであると考ええる。

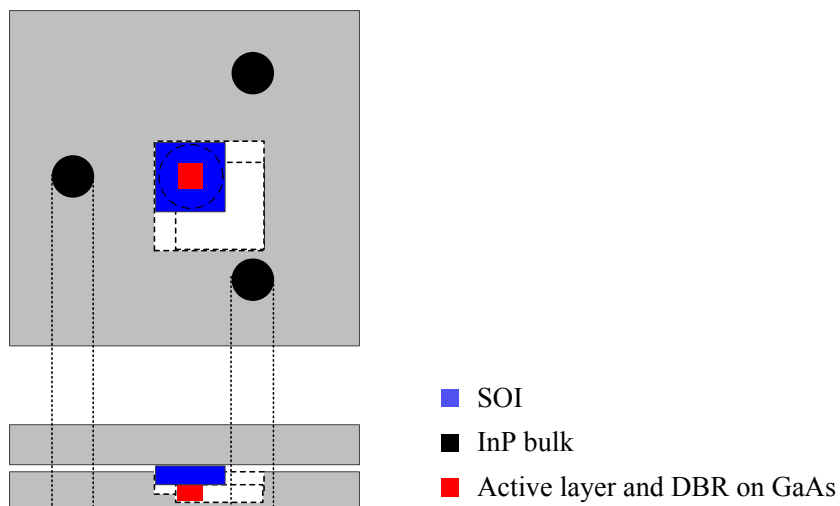


図 5-26 BCB ボンディング治具

## 5-5 光励起レーザー発振

5-4 で述べた作製プロセスにより作製した HCG-VCSEL をパルス光励起による特性評価を行った。

### 5-5-1 光励起測定系

図 5-27 に光励起測定系を示す。励起光源には波長 920 nm、パルス幅 80 fs、繰り返し周波数 80 MHz のモード同期チタンサファイアレーザ (Tsunami、Spectra Physics 社) を用いた。クライオスタットに搬入した HCG-VCSEL の DBR 側からビーム径 20  $\mu\text{m}$  の励起光を入射した。図 5-28 には HCG-VCSEL のバンドギャップエネルギー分布を黒線で、励起波長に相当するエネルギーを赤破線で示しているが、励起光は GaAs 基板および AlGaAs DBR に対しては透明であり、QWs、障壁層および DBR の InGaAsP 層で吸収される。励起光の散乱成分を除去するための LWP を通した後 InGaAs アレイ分光器 (NQ512-2.2、Ocean Optics、波長分解能: 5 nm) を用いて測定した。

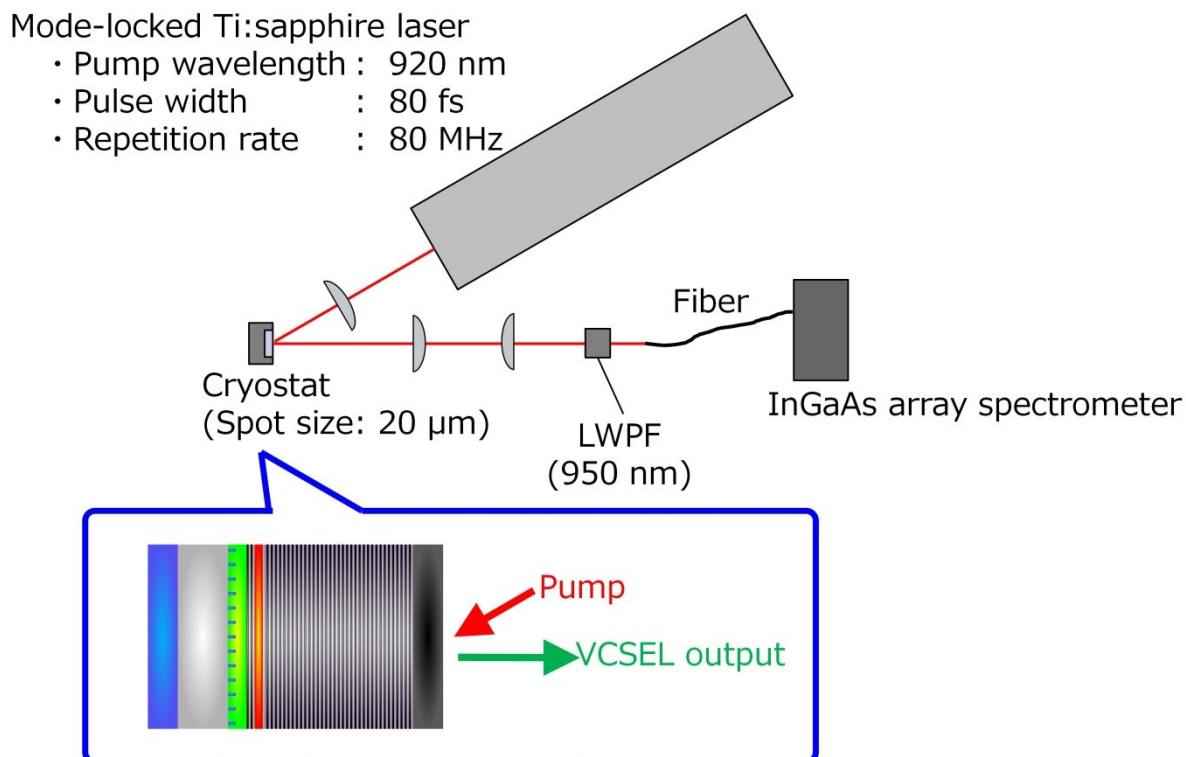


図 5-27 光励起測定系

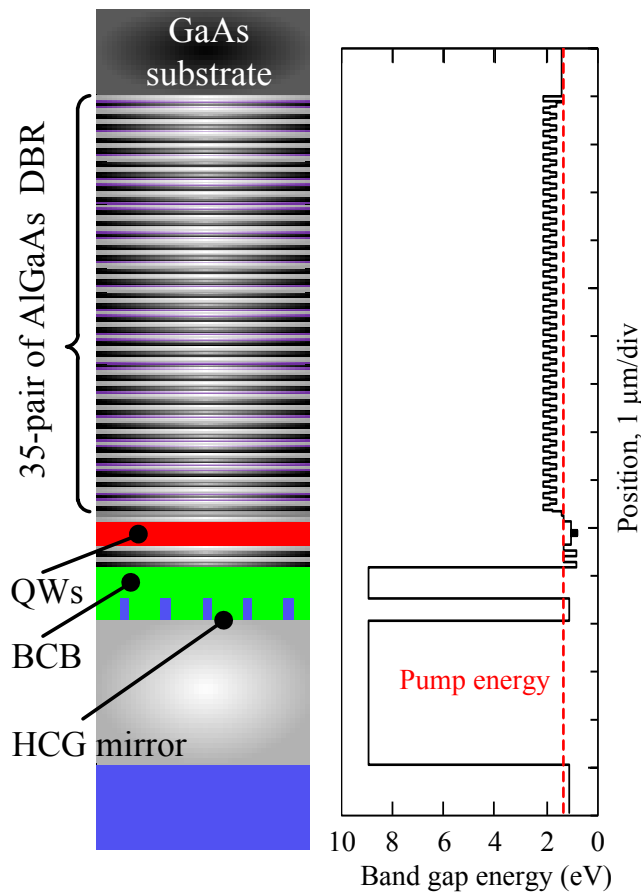


図 5-28 HCG-VCSEL のバンドギャップ分布と励起光エネルギー

### 5-5-2 HCG-VCSEL の光励起レーザ発振

図 5-29(a)に測定温度 240 K における平均励起パワーに対する HCG-VCSEL の出力強度を示す。平均励起パワー発振閾値が 50 mW (単パルス当たりのエネルギー:  $\sim 0.2 \text{ mJ/cm}^2$ ) で発振を得た。これは、偏光無依存 HCG を用いた VCSEL が発振した初めての事例である。図 5-29(b)(i)および(ii)は、それぞれ測定温度 240 K における平均励起パワー発振閾値以下および以上での発光スペクトルである。図 5-29(b)(i)における波長 1400 nm 付近の幅の広い発光成分は、DBR の反射率の低い帯域から漏れた PL の透過成分である。図 5-29(b)(ii)より、発振波長は 1527 nm であり、5 nm の波長分解能を持つ分光器の使用した測定においては単一縦モード発振を確認した。図

5-9 で示した BCB 膜厚と共振波長の関係より、この素子の BCB 膜厚は 550 nm 程度であったと考えられる。

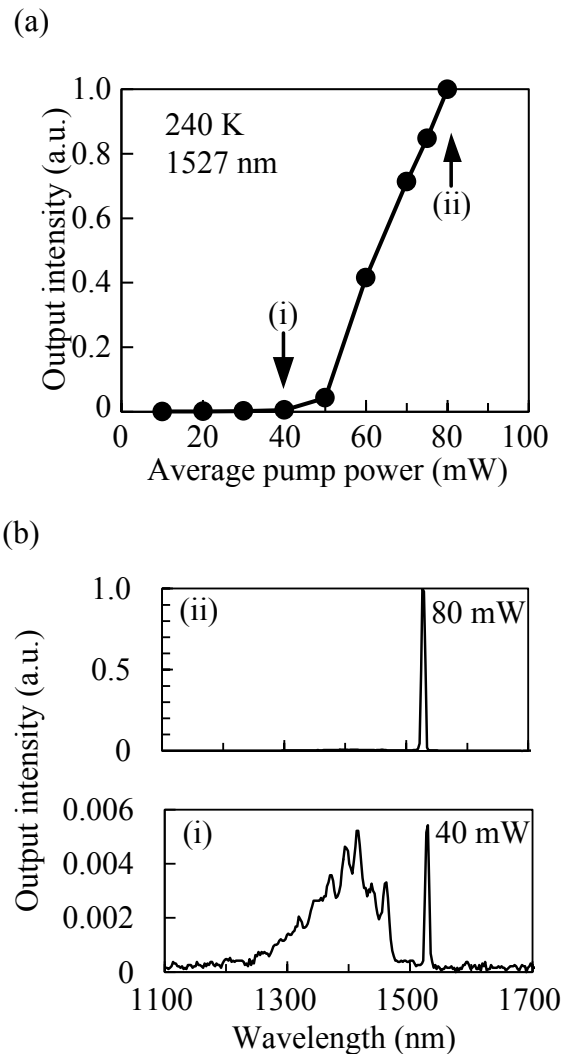


図 5-29 測定温度 240 K における(a)平均励起パワーに対する HCG-VCSEL の出力強度、(b)平均励起パワー発振閾値以下および以上での発光スペクトル

図 5-30(a)に測定温度に対する平均励起パワー発振閾値および発振波長の関係を示す。作製した HCG-VCSEL は測定温度 180-240 K の範囲で発振したが、160 K および 260 K では平均励起パワーを 400 mW に設定し励起したが発振しなかった。平均励起パワー発振閾値は 200 K において最低になり、温度が 200 K から離れるにしたがって発振閾値が上昇している。これは、測定温度の変化にともない共振波長における PL 光強度(利得)が減少するためである。波長 1527 nm の PL 強度の温度依存性を図 5-30(b)に示す。波長 1527 nm の PL 強度が最大になる測定温度は 230 K であり、発振閾値が最低になる測定温度の 200 K よりも 30 K ほど高い。

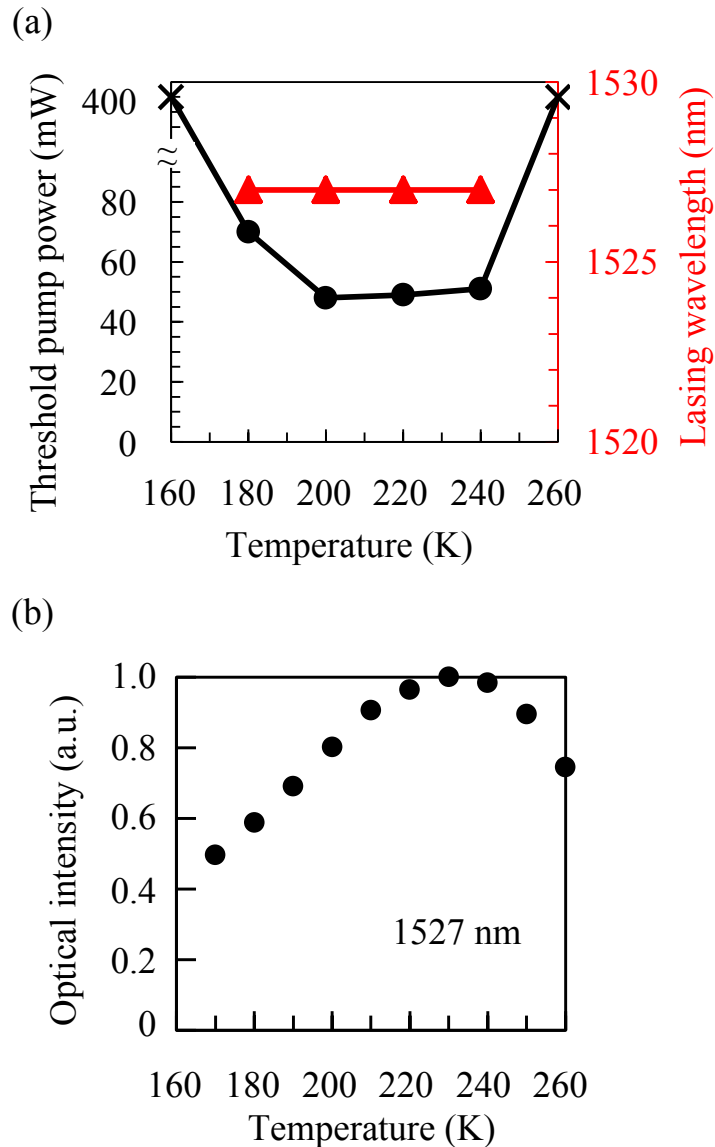


図 5-30 (a)平均励起パワー発振閾値および発振波長の温度依存性、(b)波長 1527 nm における PL 強度の温度依存性

一般的に、半導体では吸収の影響によって利得のピーク波長は PL のピーク波長よりも長波側に位置する[16]。波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯で発光する InGaAsP 量子井戸では、その波長差は 10 nm 程度であり、ピーク波長は 0.5 nm/K 程度でシフトする[17]。つまり、PL ピークと利得ピークの波長差を温度に換算すると 20 K 程度になる。したがって、最大 PL 強度と最低発振閾値の温度差の内、20 K は PL ピークと利得ピークの波長差によるものだと考えられるが、依然として 10 K の温度差が残る。これには、HCG-VCSEL を強励起したことによる量子井戸の温度上昇が原因の一つとして考えられる。

図 5-31 に測定温度 200 K、平均励起パワー 50 mW での発振偏光特性を示す。な

お、この偏光特性は図 5-27 に示した測定系の LWPF 直前に偏光子を挿入し、分光器で測定した発振波長における光強度の相対値をプロットした。主に 110° および 290° 方向の偏光で発振しているが、直交する方向に対する消光比は 2 倍程度と低い値である。また、出力が小さい 20° および 200° 方向の光強度は時間的に変動していた。作製した HCG-VCSEL に用いた HCG は 50  $\mu\text{m}$  角の正方形であり、その上に位置する活性層および DBR は HCG よりも大きい。つまり、回転対称性を持った、発振偏光方向を規定する構造が無い共振器が形成されていた。その結果、発振偏光方向が時間的に変化しており、測定上それらを同時に観測したため、消光比の小さな偏光特性になったと考えられる。なお、励起光強度、励起位置および励起光の形状を変化させても傾向は変わらなかった。

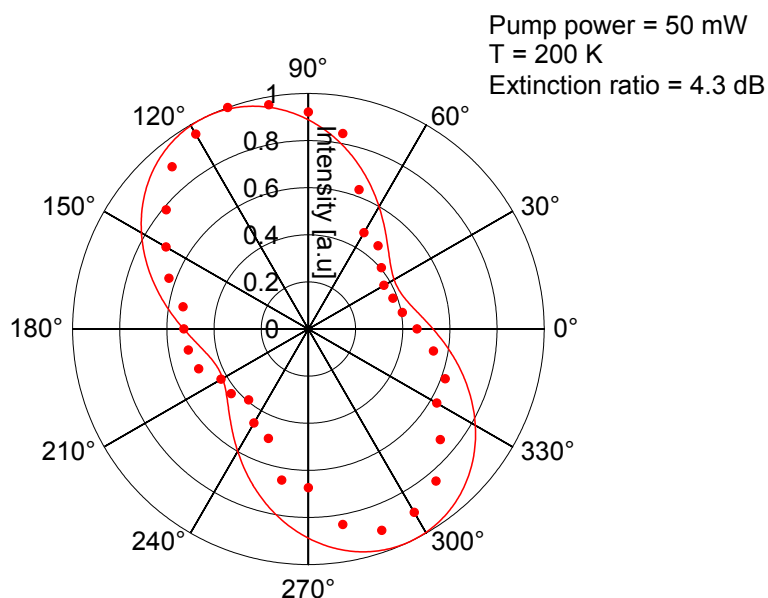


図 5-31 測定温度 200 K、平均励起パワー 50 mW での発振偏光特性

### 5-5-3 室温発振に向けた HCG 構造の検討

低温でのデバイス特性評価はデバイスをクライオスタットなどに搬入しなければならず、種々のデバイス評価や応用などに向けては、室温でのレーザ発振が望ましい。そこで、室温でのレーザ発振を目指して HCG 構造を再度検討した。

5-5-4 では矩形の格子を仮定して HCG の設計を行ったが、実際作製される HCG の格子側面は図 5-12 に示したように  $5^\circ$  程度傾斜する。そこで、HCG 上部に半導体がある構造における反射率の格子側面傾斜角依存性を調べた。図 5-32(a) に反射率計算に用いた構造を示す。Si 層中央の格子幅を固定して傾斜角を変えた。なお、活性層下側の反射率を求めるため、BCB 上に 2 ペアの InP/InGaAsP DBR を配置した。境界条件として  $z$  方向には PML、 $x$  および  $y$  方向には HCG のユニットセルを形成するように PBC を設定した。図 5-32(a) では PML を白線、PBC を赤線で示している。図 5-32(b) に反射率スペクトルの計算結果を示す。傾斜角が大きくなるにつれて、特に波長 1600 nm 付近の反射率が 2% 程度低下することがわかった。しかし、図 5-10 に示したような埋め込み材料が  $z$  方向に続く構造では、格子側面が  $6^\circ$  程度傾斜しても高反射率帯域における反射率の変化量は  $\pm 0.5\%$  程度であることを別の計算で確認している。したがって、BCB 上に半導体がある構造の反射率は格子側面の傾斜角依存性が強く、HCG の設計においてはより複雑な構造を考慮しなければならないと考える。また、図 5-12 に示したように、現状の HCG 作製プロセスでは格子の裾が広がった形状になる。裾がある場合、5-3-2 で述べたように反射率特性も変化する。つまり、HCG-VCSEL に用いた実際の HCG の高反射率帯域や反射率は計算結果とは大きく異なっていた可能性がある。

そこで、格子の底面に裾があり、側面が傾斜しても広帯域で高反射率が得られる構造パラメータを求めた。図 5-33(a) に反射率計算に用いた構造と最適化した HCG の寸法を示す。活性層下側の反射率を計算するために BCB 上に 2 ペアの DBR を配置し、半導体から光入射している。BCB の厚さは共振波長が 1550 nm になる 650 nm に固定した。傾斜角、底面の格子幅、裾の厚さはこれまでの HCG 作製で得られている典型的な値を用いた。Si の厚さ、上面の格子幅および周期をパラメータとして計算した結果、それぞれが 482 nm、222 nm および 870 nm のとき、図 5-33(b) に示す反射率スペクトルが得られる。格子側面が  $5^\circ$  傾斜し、裾が Si 層の厚さの 2 割程度 (70 nm) 残った場合でも波長 1550 nm 付近で 99% 程度の反射率が得られることがわかった。

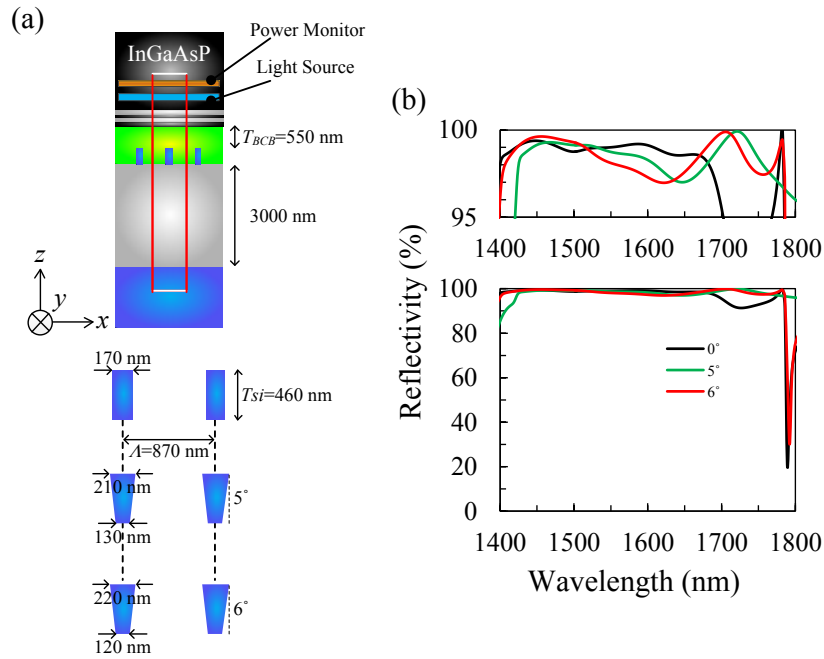


図 5-32 (a)反射率計算に用いた偏光無依存 HCG 構造、(b)反射率スペクトルの格子傾斜角依存性

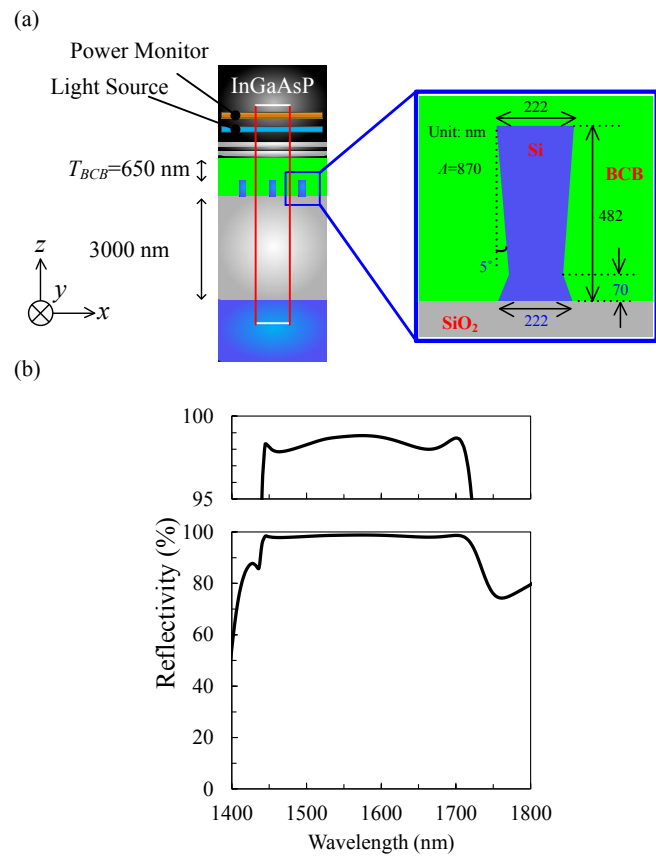


図 5-33 (a)反射率計算に用いた偏光無依存 HCG 構造、(b)反射率スペクトルの計算結果



また、BCB 膜厚分布のばらつきを低減するために、ボンディング方法を図 5-34 のように改良した。SOI 基板と治具の間に球面平凸レンズを配置することで、治具間の平行度が多少悪くても基板に垂直な方向に加重できる。その結果、所望の BCB 膜厚である  $550\pm 100$  nm を 40% の領域で得られることがわかった。ボンディング方法改良前は所望の膜厚を 20% 程度でしか得られなかったことと比較すると、大幅な歩留まりの向上が期待できる。なお第 6 章で述べるように、この BCB ボンディング方法の改良では両基板の位置ずれを低減できるように考慮している。

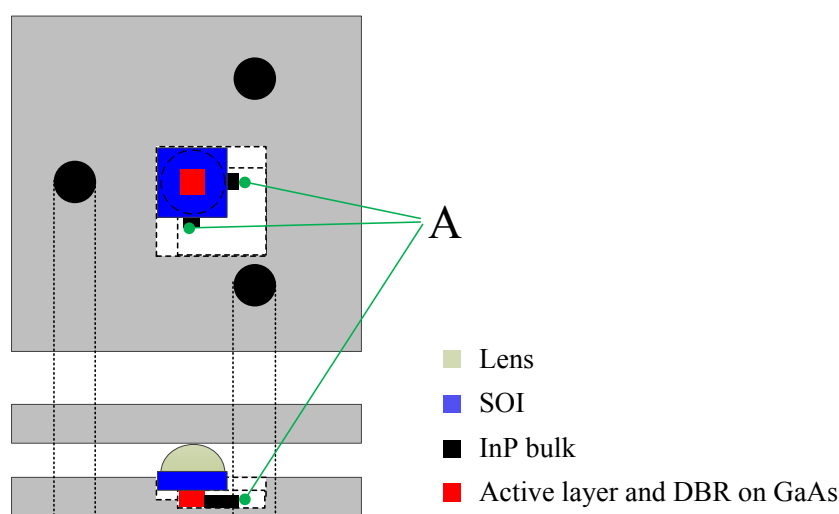


図 5-34 改良後の BCB ボンディング方法

さらに、5-5 で述べた HCG-VCSEL では HCG を  $50\ \mu\text{m}$  角の正方形の領域に作製し、その上部に HCG 領域よりも大きな活性層を配置したため、発振偏光方向を規定する構造が無く、発振偏光が時間的に変動していたと考えられる。第 4 章で述べたように、光導波路結合型 HCG-VCSEL の光導波路出力は発振偏光方向に垂直な光導波路に強く伝搬すると考えられる。つまり、発振偏光方向が時間的に変動すると、出力される光導波路の方向も変動し、測定が困難になると考えられる。そこで、偏光無依存 HCG を長方形の領域に作製し、反射鏡に非対称性を与えることで発振偏光方向を制御できると考えた。

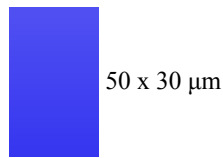
#### 5-5-4 室温での光励起レーザ発振

以上 3 つの改善点を反映して 5-4 で述べたデバイス作製プロセスにより HCG-VCSEL を作製し、図 5-27 に示した同様の測定系を用いて光励起測定を行った。

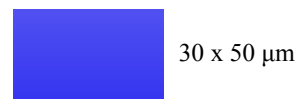
図 5-35 に測定結果を示す。図 5-35(a)、(b)はそれぞれ  $50 \times 30 \mu\text{m}$  の縦長および  $30 \times 50 \mu\text{m}$  の横長長方形に形成した偏光無依存 HCG を片側反射鏡とする VCSEL の測定結果を示している。図 5-35(a-2)、(b-2)に測定温度 300 K における平均励起パワーに対する HCG-VCSEL の出力強度を示す。平均励起パワー発振閾値はいずれも 12 mW 程度(単パルス当たりのエネルギー:  $\sim 0.05 \text{ mJ/cm}^2$ )でレーザ発振を得た。図 5-35(a-3)、(b-3)に平均励起パワー発振閾値前後の発光スペクトルを示す。いずれの HCG-VCSEL においても 5 nm の波長分解能を持つ分光器の使用した測定においては単一縦モード発振を確認した。最後に図 5-35(a-4)、(b-4)に平均励起パワー 20 mW での発振偏光特性を示す。なお、励起光の偏光は  $90^\circ$  である。いずれの HCG-VCSEL においても HCG の長手方向に沿った直線偏光で発振していることがわかる。励起光の励起位置、偏光、強度を変えても発振偏光は変化しなかった。HCG の反射率は偏光に依存しないが、反射鏡の領域が大きい長手方向に沿う偏光方向の光は光損失が小さくなるため、発振偏光方向が長手方向に選択されたと考えられる。また、励起光の偏光を  $90^\circ$  回転し、 $0^\circ$  偏光としても同様に長手方向の直円偏光でレーザ発振を得た。以上の結果は、井桁状の HCG は偏光無依存に近く、偏光無依存 HCG 領域の形状に非対称性を持たせることにより発振偏光が制御できる可能性を示す結果と言え、光励起による光導波路結合型 HCG-VCSEL の光導波路出力を観測する上で重要な知見といえる。

図 5-36 に発振閾値の測定温度依存性を示す。測定温度 240 K での発振閾値は縦長 HCG を用いた素子では 6 mW 程度、横長 HCG を用いた素子では 3 mW 程度であった。図 5-30 に示したように低温(200-240 K)での平均励起パワー発振閾値が 50 mW 程度であった改良前の HCG-VCSEL の測定結果と比較しても非常に低い閾値が得られており、大幅な低閾値化に成功した。これは、HCG 構造を改善したことで反射率を向上できたためだと考えられる。なお、この HCG-VCSEL の試作では 14 素子(64 素子中)で室温でのレーザ発振を得た。5-5-2 では低温で 1 素子のみのレーザ発振しか得られなかったことを鑑みると、大幅な歩留まりの向上を達成できたと言える。また、長方形の偏光無依存 HCG を片側反射鏡とした VCSEL の試作において、長方形の大きさを  $50 \times 30$ 、 $50 \times 20$ 、 $50 \times 10 \mu\text{m}$  と変えて作製した結果、 $50 \times 30 \mu\text{m}$  の長方形 HCG から成る VCSEL でのみレーザ発振が得られた。つまり、短辺が  $20 \mu\text{m}$  以下の長方形 HCG では、反射損失が大きくなり、発振しなかったと考えられる。

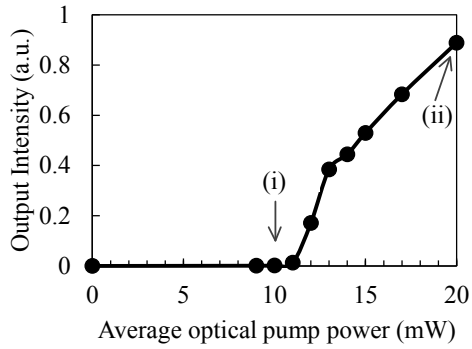
(a-1)



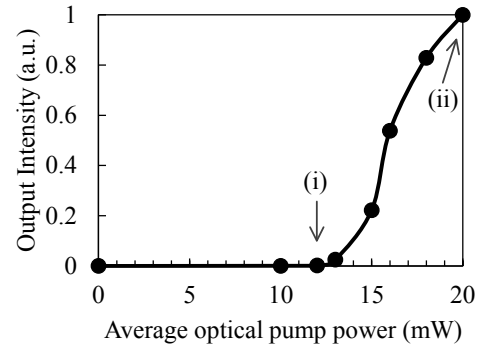
(b-1)



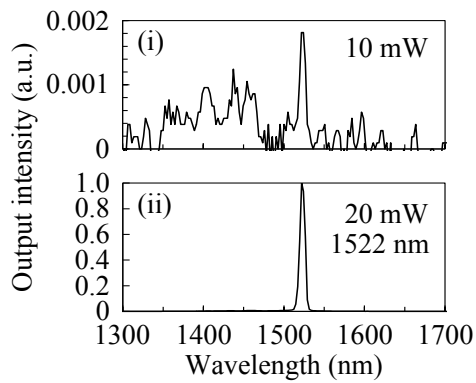
(a-2)



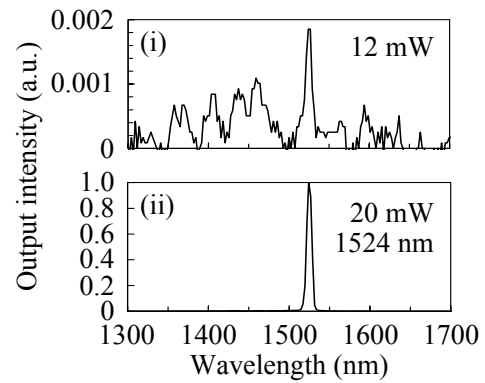
(b-2)



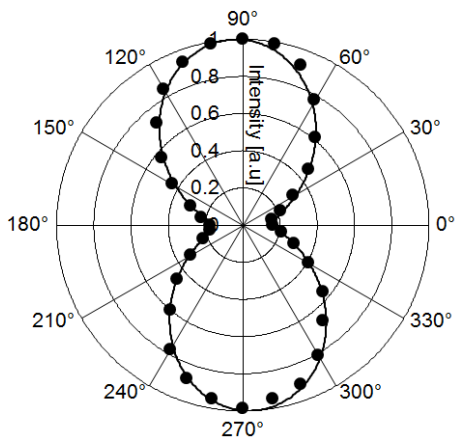
(a-3)



(b-3)



(a-4)



(b-4)

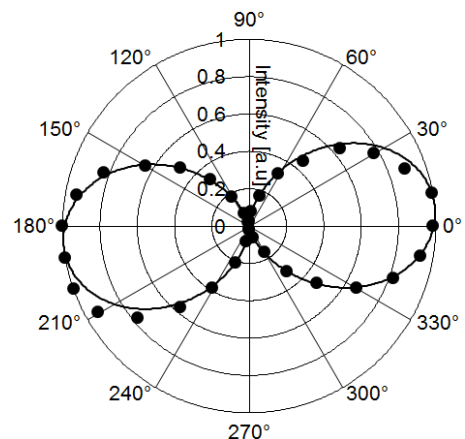


図 5-35 (a)縦長、(b)横長の偏光無依存 HCG を用いた VCSEL の室温における光出力特性。(1)HCG 形成領域、(2)光出力の励起強度依存性、(3)(i)発振閾値以下、(ii)発振閾値以上のスペクトル、(4)発振偏光特性

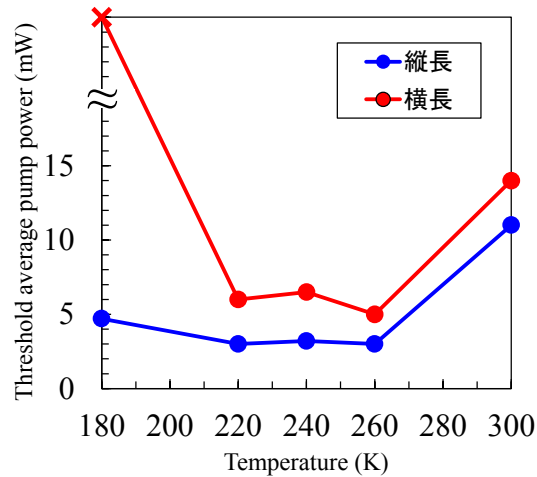


図 5-36 発振閾値の測定温度依存性

図 5-37 に室温で発振した素子(14/64 素子)の発振偏光をまとめる。横長 HCG を用いた VCSEL は長辺に沿った  $10^\circ$  程度の偏光で主に発振し、縦長 HCG を用いた VCSEL は長辺に沿った  $100^\circ$  程度の偏光で半分の素子が発振した。また、正方形 HCG を用いた VCSEL の発振偏光はランダムであり、測定毎に異なる結果であった。これは、図 5-31 に示した結果と一致する。発振した素子数が多い(29/64 素子)測定温度 240 K での発振偏光を図 5-38 にまとめる。240 K では、横長 HCG を用いた VCSEL は長辺に沿った  $15^\circ$  程度の偏光で半分の素子が発振し、縦長 HCG を用いた VCSEL は長辺に沿った  $100^\circ$  程度の偏光で主に発振した。正方形 HCG を用いた VCSEL の発振偏光はやはりランダムであった。なお、図 5-36、37 は励起光の偏光を  $90^\circ$  に設定して測定した。より詳細な検討については系統的な研究が必要になるが、室温と 240 K で発振偏光が  $90^\circ$  程度回転する素子もあり、温度などの影響で発振偏光がスイッチングした可能性がある。

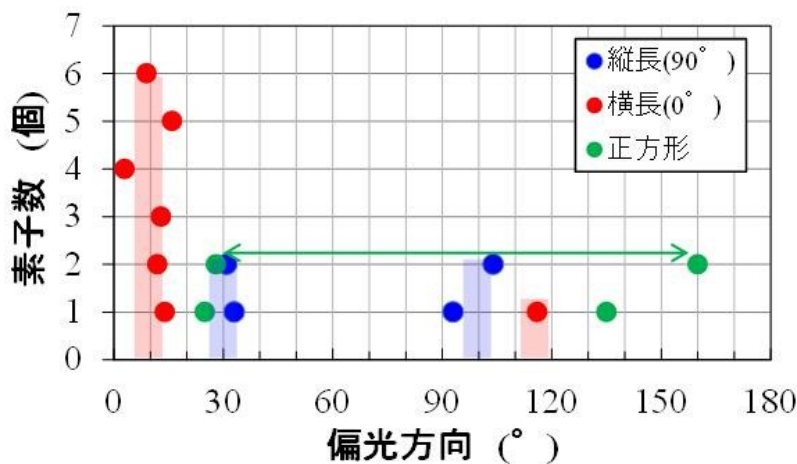


図 5-37 室温(300 K)における発振偏光ヒストグラム

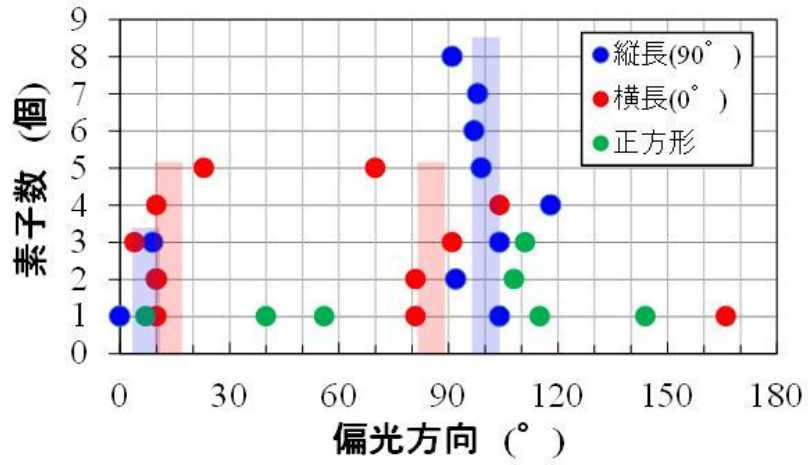


図 5-38 測定温度 240 K における発振偏光ヒストグラム

上記の光励起測定は本研究室の横田信英氏の協力を得て行われた。

## 5-6 まとめ

本章では、活性層ウェハと DBR ウェハをウェハ直接ボンディングで接着し、活性層と SOI 基板上偏光無依存を BCB ボンディングで接着して作製した SOI 基板上偏光無依存 HCG-VCSEL の設計、作製および光励起測定について述べた。また、3次元 FDTD 法を用いた偏光無依存 HCG の最適化、格子間が BCB で埋まった偏光無依存 HCG の反射率測定およびデバイス作製プロセスについても述べた。以下に得られた知見を示す。

- (1) 格子間が BCB で埋まった井桁状の HCG に対して入射光の偏光方向を  $0^\circ$  から  $180^\circ$  まで  $15^\circ$  刻みで変化させて反射率測定を行った結果、いずれの偏光方向に対してもよく一致した反射率スペクトルが得られ、井桁状の HCG が偏光無依存な反射率特性を有することを実証した。
- (2) 偏光無依存 HCG を適用した VCSEL を作製し、測定温度  $240\text{ K}$ 、平均励起パワー発振閾値  $50\text{ mW}$  でのレーザ発振を観測した。
- (3) 格子の側面の傾斜および格子底面の裾を考慮した HCG 構造を設計し VCSEL に適用した結果、室温において平均励起パワー発振閾値  $12\text{ mW}$  程度での光励起レーザ発振を実証した。また、測定温度  $240\text{ K}$  での平均励起パワー発振閾値は  $3\text{ mW}$  程度であり、HCG 構造を改良することで大幅な低閾値化に成功した。また、改良前の試作では低温でのレーザ発振を 1 素子のみで得たが、改良後は室温でのレーザ発振を 14 素子 (64 素子中) で得られ、大幅な歩留まりの向上を達成できたといえる。
- (4) 形成した領域が非対称である偏光無依存 HCG ( $50 \times 30\ \mu\text{m}$  の長方形) を片側反射鏡とする VCSEL では、長方形の長手方向に沿った直線偏光で発振することがわかった。これは、励起光の偏光方向に依らず共振器を成す偏光無依存 HCG の形状に非対称性を持たせることで発振偏光方向を制御できることを示すと同時に、井桁状の HCG が偏光無依存であることを示している。これらの結果は、光励起による光導波路結合型 HCG-VCSEL の光導波路出力を観測する上で重要な知見といえる。

## 5-7 参考文献

- [1] M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, *Nat. Photonics* **1**, 119 (2007).
- [2] Å. Haglund, J. S. Gustavsson, J. Bengtsson, P. Jedrasik, and A. Larsson, *IEEE J. Quantum Electron.* **42**, 231 (2006).
- [3] M. C. Y. Huand, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171108 (2008).
- [4] C. Sciancalepor, B. B. Bakir, X. Letartre, J. Harduin, N.. Olivier, C. Seassal, J. M. Fedeli, and P. Viktorovitch, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24**, 455 (2012).
- [5] H. Kawaguchi, T. Katayama, and K. Ikeda, Japan Patent Application 2012-183539 (2012).
- [6] K. Ikeda, K. Takeuchi, K. Takayose, I. -S. Chung, Mørk, and K. Hitoshi, *Appl. Opt.* **52**, 1049 (2013).
- [7] J. Piprek, Y. A. Akulove, D. I. Babic, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 1814 (1998).
- [8] C. Gierl, T. Gruendl, P. Debernardi, K. Zogal, C. Grasse, H. A. Davani, G. Böhm, S. Jatta, F. Küppers, P. Meißner, and M. C. Amann, *Opt. Express* **19**, 17336 (2011).
- [9] 伊賀 健一, 小山 二三夫, 「面発光レーザの基礎と応用」, 共立出版株式会社 (1999).
- [10] 沼居 貴陽, 「半導体レーザ工学の基礎」, 丸善株式会社 (1996).
- [11] G. Roelkens, D. V. Thourhout and R. Beats, *Electron. Lett.* **41**, 561 (2005).
- [12] R. Magnusson and M. S. Saremi, *Opt. Express* **16**, 3456 (2008).
- [13] F. Koyama, *Proc. of SPIE* **8270**, 827005 (2012).
- [14] 高寄 健太郎、奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 平成 24 年度修士論文
- [15] [http://www.microchem.com/PDFs\\_Dow/cyclotene\\_3000\\_dry\\_etch.pdf](http://www.microchem.com/PDFs_Dow/cyclotene_3000_dry_etch.pdf)
- [16] 末松 安晴, 「光デバイス」, コロナ社 (1986).
- [17] S. Rapp, J. Piprek, K. Streubel, J. André, and J. Wallin, *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 1389 (1997).

# 第 6 章 光導波路結合型 HCG-VCSEL に向けたデバイス構造 および作製プロセスの検討

## 6-1 はじめに

本章では、光導波路結合型 HCG-VCSEL の作製に向け、検討した構造について述べる。そして、その構造を作製するための要素技術の確立および課題について述べる。

## 6-2 光導波路結合型 HCG-VCSEL 構造

5-4 で述べたデバイス作製プロセスで HCG 作製を行うときに HCG に連続した光導波路を形成すれば、目的とする HCG-VCSEL が作製できるが、光導波路出力を観測するにはいくつかの課題がある。光導波路出力を観測する最も単純な方法として、光導波路端面をへき開により露出することが考えられる。しかし、ウェハ直接ボンディングなどの接着方法と比較して、BCB ボンディングの接着強度は弱いため、へき開時に GaAs 基板上的 DBR および活性層と、SOI 基板が BCB 界面で剥離する。そこで、基板面内方向に伝搬する光を面直方向に出力させる方法としてグレーティングカップラ[1]の適用を検討した。

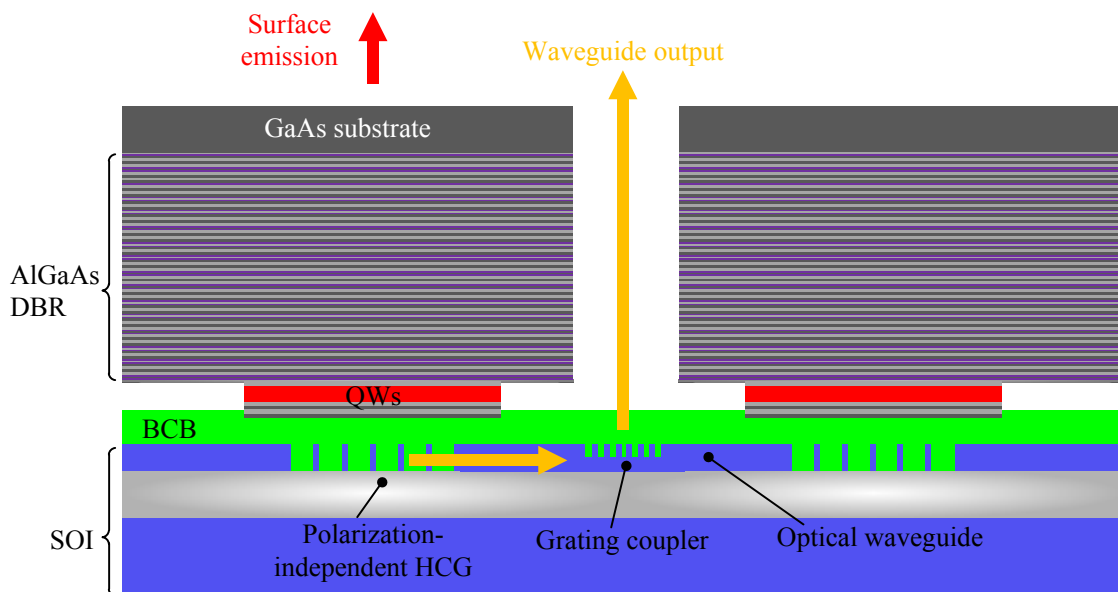


図 6-1 光導波路結合型 HCG-VCSEL 構造概念図



図 6-1 に示すように、光導波路上に 2 次の回折格子であるグレーティングカップラを形成すると、光導波路出力が基板面直方向に散乱され、観測できると考えられる。ただし、VCSEL のレーザ発振光である光導波路出力の波長は DBR の高反射率帯に相当するため、出力を観測するためにはグレーティングカップラ上部の DBR を除去しなければならない。

## 6-3 要素技術の確立

### 6-3-1 グレーティングカップラを用いた光導波路出力の取出し

2 次の回折格子であるグレーティングカップラは、光ファイバからの出射光を Si 基板の上に形成した光導波路へ結合させるときなどに用いられる。結合効率を上昇させるために 1 次の回折格子と組み合わせた構造[1]や、格子と基板間に DBR を設けた構造などが提案されている[2]。しかし、本研究では光導波路出力を観測することを主たる目的とし、特別な構造を用いないグレーティングカップラを検討した。

まず、2 次元 FDTD 法を用いてグレーティングカップラの光出力特性を求めた。図 6-2 に示した構造に対して、+x 方向から光を入射し、グレーティングカップラ上部に配置した Monitor で回折光を観測した。第 4 章で述べたように、光導波路出力の伝搬モードは、VCSEL の発振偏光方向に垂直な光導波路では TE モードであり、平行な光導波路では TM モードである。そこで、両伝搬モードに対する光出力特性を求めた。光導波路の厚さは室温発振した HCG-VCSEL に使用した HCG の厚さである 482 nm、格子の周期は光導波路の有効屈折率を 3.3 としたときに 1/2 波長の長さに相当する 464 nm、格子の深さは 100 nm、周期に対する格子幅で定義される DC(Duty Cycle) は 0.5 とした。境界条件は PML で規定し、グレーティングカップラの領域を 20  $\mu\text{m}$  とした。

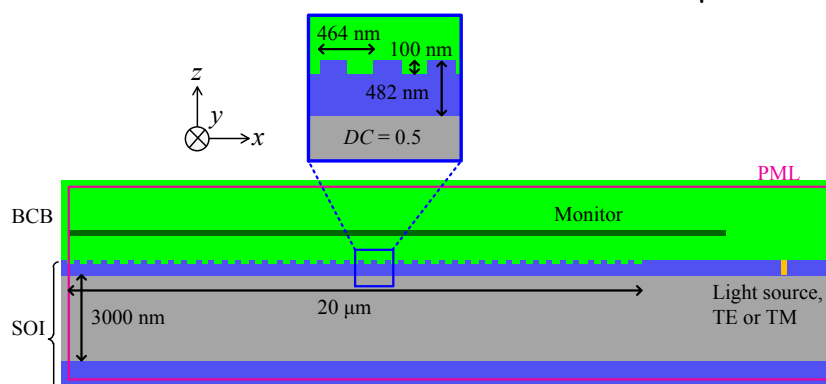


図 6-2 計算に用いたグレーティングカップラの構造

図 6-3 に TE、TM モードに対する基板面直(+z)方向への結合効率の波長依存性を示す。いずれの伝搬モードに対しても波長 1550 nm 付近では 60%程度の光が基板面直方向に回折されることがわかった。最も作製誤差が生じると考えられる格子の深さを  $100\pm 20$  nm で変化させて結合効率を求めると、TE モードでは 10%程度、TM モードでは 5%程度変化することがわかった。つまり、RIE で十分制御可能な $\pm 20$  nm の範囲で格子の深さが変化しても 50%以上の光導波路出力が面直に回折される。したがって、光導波路出力の観測においてグレーティングカップラを用いることは有用であると考えられる。

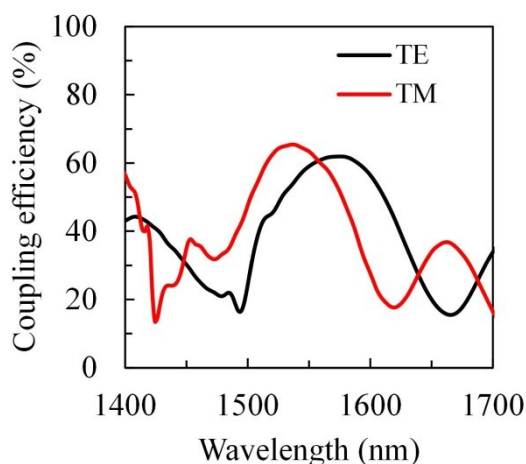


図 6-3 TE、TM モードに対する基板面直方向への結合効率の波長依存性

最後に、SOI 基板上に光導波路およびグレーティングカップラを作製し、回折光が観測できるかを確認した。図 6-4 に作製した光導波路およびグレーティングカップラの SEM 画像を示す。作製方法は、まず EB 描画装置および RIE でグレーティングカップラを形成した。その後、EB 描画装置の位置合わせ機能を用いて、グレーティングカップラの上に光導波路を形成した。図 6-5(a)にはサンプル表面の光学顕微鏡画像を示している。グレーティングカップラから 500  $\mu\text{m}$  程度離れた光導波路部分をへき開し、そこから波長 1550 nm のレーザ光源を入射した。その結果、図 6-5(b)、(c)に示すようにグレーティングカップラを用いて、光導波路出力を面直方向に取り出すことに成功した。

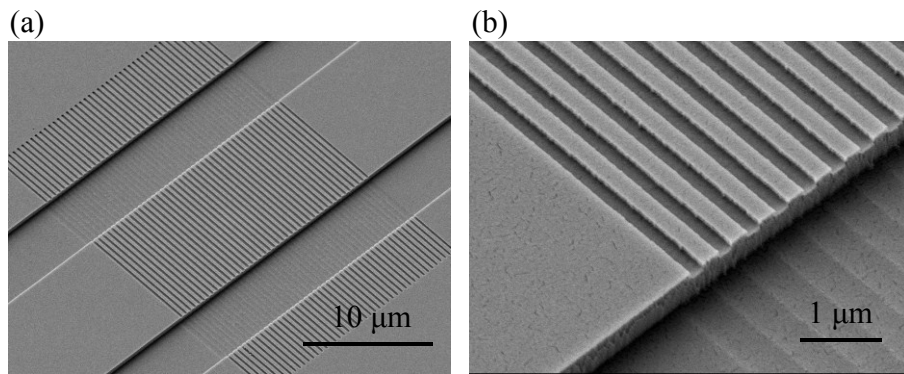


図 6-4 (a)SOI 基板上に作製した光導波路およびグレーティングカップラの SEM 画像、(b)は(a)の拡大図

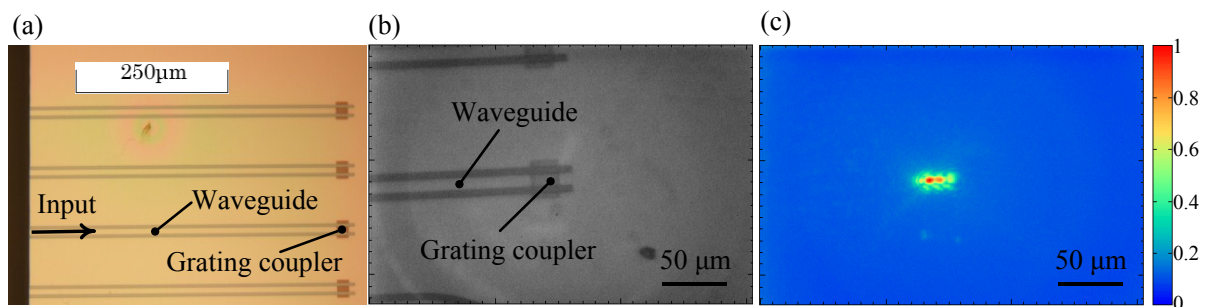


図 6-5 (a)サンプル表面の光学顕微鏡画像、ビジコンカメラで撮影した(b)サンプル表面画像、および(c)光強度分布

### 6-3-2 BCB ボンディング時の位置ずれの低減

光導波路結合型 HCG-VCSEL に向けて偏光無依存 HCG の配置について検討した。図 6-6 では、黒四角で光導波路を結合した偏光無依存 HCG、黒破線でグレーティングカップラを形成する位置を示している。また、赤四角では活性層メサ、緑四角で光導波路出力を取り出すために溝加工した DBR を示している。つまり、黒、赤、緑四角が重なる領域が VCSEL 共振器となる。光導波路を結合した HCG とグレーティングカップラは EB 描画装置で位置合わせして作製するため、両者の位置ずれは最大で数マイクロンである。しかし、活性層と HCG の位置関係は、BCB ボンディングで両基板を固定したときに決まり、これまでは最大で 200  $\mu\text{m}$  程度の位置ずれが生じていた。つまり、位置合わせの精度が非常に低いため、図 6-6 の赤四角で示した活性層がどの位置に配置されるかが予想できない。これには図 6-6(a)のように 120  $\mu\text{m}$  周期で長辺 40  $\mu\text{m}$  の HCG を配置することで対応できるが、2 方向の光導波路を結合する場合、曲がり導波路を含めなければならない。曲がり導波路を用いると特にマルチモードが伝搬する場

合は伝搬損失が生じやすく、出力光導波路特性の評価を妨げると考えられる。そこで図 6-6(b)のように、HCG に直線導波路のみを結合した最も単純な構造を検討した。この場合、BCB ボンディング時に生じる位置ずれを 60  $\mu\text{m}$  程度に抑えなければならない。

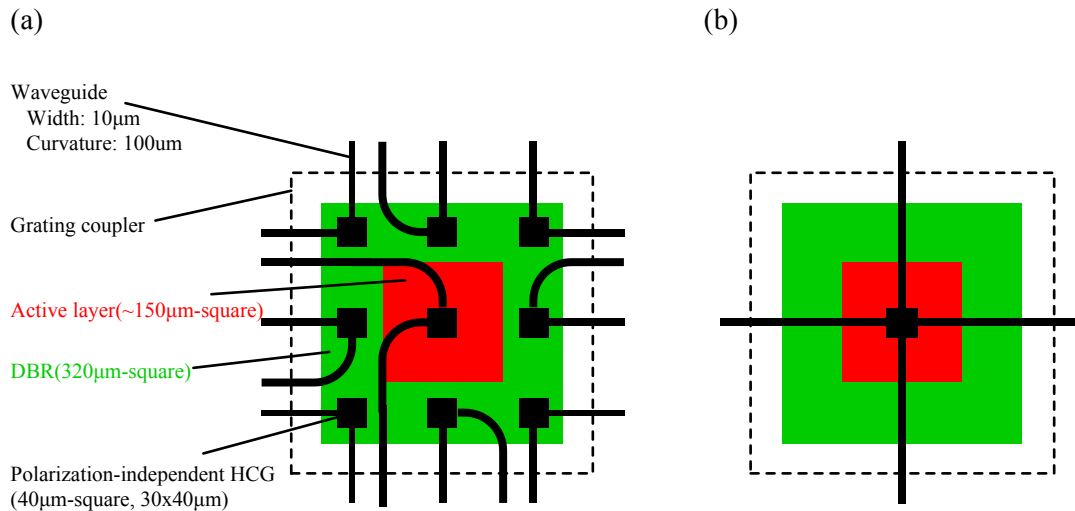


図 6-6 光導波路結合型 HCG の配置図、(a)BCB ボンディング時の位置ずれを考慮した配置、(b)直線導波路を 4 方向に結合した HCG

そこで、図 5-26 に示した BCB ボンディング方法を図 5-34 のように改良した。図 5-26 では活性層が接着された DBR ウェハ上に SOI 基板を配置し、その上に治具を直接配置、固定していた。この方法では、治具を固定するときに SOI 基板と治具が面で接するため、接触面積が大きくなり、治具の微量の動きに連動して SOI 基板も動いていた。そこで、図 5-34 のように SOI 基板と治具の間に球面平凸レンズを配置した。この方法では、治具は球面の一点で接するため、治具と連動した SOI 基板の位置ずれが緩和される。さらに、SOI 基板を配置後、薄い基板(図 5-34 中 A)で DBR ウェハを押すことで、SOI 基板を置いたことによる DBR ウェハの位置ずれを改善できる。

この方法による BCB ボンディングでの位置ずれは 40  $\mu\text{m}$  程度であり、改善前の 200  $\mu\text{m}$  よりも大幅に位置ずれを向上できた。また、目標とした 60  $\mu\text{m}$  以内の位置ずれであるため、図 6-6(b)に示した直線導波路を 4 方向に結合した HCG を反射鏡とする VCSEL を作製できる。

### 6-3-3 グレーティングカプラ露出

6-2 で述べたように、光導波路出力は DBR の高反射率帯の波長であるため、外部へ取り出すためには DBR を除去してグレーティングカプラを露出する必要がある。研磨およびウェットエッチングによって SOI 基板上に BCB ボンディングした DBR ウェハを薄くした後、ウェットもしくはドライエッチングによってグレーティングカプラ上部の基板および DBR を除去するという方針の下、これまでにいくつかのテストプロセスを試みたが、未だプロセスを確立できていない。テストプロセスによって得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 熱膨張係数の差異による BCB ボンディング時に発生する応力の影響で、基板を 100  $\mu\text{m}$  以下まで研磨すると多数の亀裂が生じる。
- 2) 基板が割れない 150  $\mu\text{m}$  程度まで研磨した後、GaAs をエッチングする硫酸系あるいはクエン酸系エッチング溶液で基板を薄くすると、基板は割れないが、SOI/GaAs 基板間に溶液が侵入し基板表面に損傷を与える。
- 3) 基板が割れない 150  $\mu\text{m}$  程度まで研磨した後、基板間に溶液が侵入しないようにフォトリジストで保護しながら、クエン酸系エッチング溶液で基板を薄くすると、基板は割れないが、真空中あるいはプラズマ中に置かれたときに基板に亀裂が生じるとともに剥離する。

### 6-4 今後の展望

本研究は、数値解析およびデバイス作製・評価を基に、偏光双安定 VCSEL を光導波路で結合した Si 基板上の偏光双安定デバイスの実現への知見を得ることを目的として行われた。このデバイスでは、偏光双安定 VCSEL の発振偏光によって出力光導波路が切り替えられ、その出力光を隣り合う偏光双安定 VCSEL に入力することで発振偏光状態を制御でき光バッファメモリに用いられる偏光双安定 VCSEL アレイを小型化できると考えた。年々増加する情報通信量に伴って消費電力の増大が問題になるなか、この機能をもつデバイスが実現できれば、より高速かつ低消費電力な情報通信が可能になる全光型信号処理の発展において極めて重要な役割を果たすと考える。さらに、本研究で提案した HCG-VCSEL は Si 基板上に形成するため、LSI などの電子デバイスとの集積化も期待でき、より高機能なオンチップデバイス的一端を担うと考える。

光導波路出力の観測、ならびに出力光導波路切り替えの実証に向けた検討は上述したが、デバイスの実用化に向けては他にも検討すべき課題がある。まず、本研究

では、単一の光導波路結合型 HCG-VCSEL を対象として偏光双安定 VCSEL の発振偏光によって出力光導波路が切り替えられることを数値計算によって明らかにした。しかし、光バッファメモリとして用いる場合、光導波路からの入力光によって VCSEL の発振偏光を制御する必要がある。このような複数の VCSEL を結合したときの発振偏光制御の可能性や、必要な光導波路出力パワーならびに結合効率などについては検討が必要となる。また、本研究ではパルス励起によるレーザ発振を達成したが、CW 励起や電流注入による発振に向けては、放熱特性やデバイス構造などの検討する必要がある。BCB の熱伝導率は  $0.0029 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$  [3]であり、Si( $1.3 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$ )や GaAs( $0.55 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$ )などの半導体と比べて 2 桁以上低い。現状のデバイス構造では熱源となる活性層直下に BCB が配置されており、放熱に優れた構造を検討しなければならないと考える。

## 6-5 まとめ

本章では、光導波路結合型 HCG-VCSEL の光導波路出力を取り出す方法としてグレーティングカプラを用いた構造を提案した。数値計算によって、グレーティングカプラを設計し、光導波路出力の 60%程度を基板の面直方向に回折できることを示した。さらに、SOI 基板上に光導波路およびグレーティングカプラを作製し、光導波路出力を面直方向に取り出すことに成功した。次に、BCB ボンディング時に生じる HCG と活性層の位置ずれ、および膜厚分布を改善するために、ボンディング治具に球面平凸レンズを取り入れた。その結果、改善前は  $200 \mu\text{m}$  程度であった位置ずれを平均  $40 \mu\text{m}$  程度まで低減でき、直線導波路を 4 方向に結合した HCG を反射鏡とする VCSEL が作製可能なプロセスを構築した。最後に、グレーティングカプラ露出プロセスの課題を述べた。

## 6-5 参考文献

- [1] D. Taillaert, W. Bogaerts, P. Bienstman, T. Krauss, P. Van Daele, I. Moerman, S. Versteuyft, K. De Mesel, and R. Baets, *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 949 (2002).
- [2] D. Taillaert, F. V. Laere, M. Ayre, W. Bogaerts, D. V. Thourhout, P. Bienstman, and R. Baets, *Jpn. J. App. Phys.* **45**, 6071 (2006).
- [3] [http://www.microchem.com/PDFs\\_Dow/cyclotene\\_3000\\_dry\\_etch.pdf](http://www.microchem.com/PDFs_Dow/cyclotene_3000_dry_etch.pdf)
- [4] M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, *Nat. Photonics* **1**, 119 (2007).

## 第 7 章 結論

本研究では、SOI 基板上的の偏光無依存 HCG、HCG に連続した複数の光導波路、および HCG を片側反射鏡とした偏光双安定 VCSEL から構成される光導波路結合型 HCG-VCSEL の実現に向けて、HCG の反射率および光導波路への結合効率などの基本的諸特性、VCSEL の発振偏光方向によって出力光導波路が切り替わることを数値計算を基に明らかにすること、および偏光無依存 HCG を反射鏡とした VCSEL の光励起レーザ発振を実現することを目的とした。

第 1 章では、本研究の背景として近年の研究状況、光導波路結合型 HCG-VCSEL の構想に至った経緯を述べた。

第 2 章では、Si 基板上 1.55  $\mu\text{m}$  帯 HCG-VCSEL の構造について述べ、それを実現するための要素技術である HCG および異種材料接着技術について説明した。

第 3 章では、2 次元 FDTD 法を用いて、格子に平行な直線偏光に高反射率を示す TE-HCG および直交する直線偏光に高反射率を示す TM-HCG に光導波路を結合した 2 種類の光導波路結合型 HCG に対して反射率、結合効率および伝搬モードの構造依存性について述べた。その結果、主に HCG の構造が反射率特性に影響を与え、光導波路始点における光強度が結合効率に影響を与えることがわかった。また、広帯域で高反射率が得られるように最適化した HCG 構造では、TE-HCG の Si 層の厚さは TM-HCG に比べて半分程度になるため光導波路の単一モード条件を満足する。その結果、光導波路結合型 TE-HCG の光導波路には基本モードのみが伝搬するが、光導波路結合型 TM-HCG の光導波路には 1 次モードも混在して伝搬することがわかった。

次に、光導波路を結合した TE-HCG および TM-HCG を片側反射鏡とした VCSEL 共振器に対して Q 値、閾値利得および光導波路出力の構造依存性について述べた。TE-HCG からの反射光は TM-HCG に比べて放射状に広がるため、反射を繰り返す共振器では共振横モードが広がる。その結果、光導波路結合型 TE-HCG-VCSEL の共振器内の光導波路出力は、光導波路結合型 TM-HCG-VCSEL の 30 倍程度大きくなるが、Q 値は 1/3 程度になることがわかった。

第 4 章では、複数の光導波路を結合した偏光無依存 HCG を片側反射鏡とした VCSEL に対して 3 次元 FDTD 法により光出力特性の解析を行った。その結果、VCSEL の共振モードの偏光方向に垂直な光導波路へは、平行な光導波路よりも 11.9 倍大きなパワーが伝搬することがわかった。これは目的の機能とした、偏光双安定 VCSEL の発振偏光方向によって出力光導波路を切り替えられることを明らかにした重

要な結果である。また、光導波路へは共振器内の 0.23%のパワーが伝搬することがわかった。これは、DBR を共振器とする一般的な VCSEL の面発光出力と同程度の光導波路出力である。最後に、強く光が結合する光導波路の伝搬モードは TE モード、弱く光が結合する光導波路の伝搬モードは TM モードであることがわかった。

第 5 章では、片側反射鏡に偏光無依存 HCG を用いた VCSEL の設計、格子間を BCB で埋まった HCG の反射率測定、作製プロセス、および光励起レーザ発振について述べた。HCG の反射率測定では、入射光の偏光方向を  $0^{\circ}$  から  $180^{\circ}$  まで  $15^{\circ}$  刻みで変化させたが、いずれの偏光方向に対してもほぼ同じ反射率スペクトルが得られ、井桁状の HCG が偏光無依存な反射率特性を有することを実証した。また、偏光無依存 HCG を適用した VCSEL を作製し、光励起による世界初のレーザ発振(測定温度 240 K、平均励起パワー発振閾値 50 mW)を達成した。また、HCG の格子側面が傾斜することならびに底面に裾が形成されることを考慮した構造の最適化および BCB ボンディング方法の改良により BCB 膜厚分布のばらつきを低減した結果、室温でのレーザ発振(平均励起パワー発振閾値 12 mW)を実現し、大幅な低閾値化とともに歩留まりを飛躍的に向上できた。さらに、偏光無依存 HCG を形成する領域を長方形にすることにより、VCSEL の発振偏光方向の安定化にも成功した。

第 6 章では、光導波路結合型 HCG-VCSEL の光導波路出力を取り出す方法としてグレーティングカプラの適用を提案し、その設計、作製プロセスを確立した。そして、光導波路とグレーティングカプラから成る構造において光導波路端面から入射した光を基板面直方向へ取り出すことに成功した。また、BCB ボンディングの方法を改良し、位置ずれの低減を達成した。これらの結果は、歩留まりの向上が期待できるだけでなく、光導波路結合型 HCG-VCSEL の実現に向けた重要な知見である。課題として残された、光導波路出力を観測するためのグレーティングカプラの露出プロセスを確立できれば、光導波路結合型 HCG-VCSEL の出力光導波路を観測できると考えられる。

これらで得られた知見は、偏光双安定 VCSEL の光出力を面内の光導波路へ結合でき、発振偏光方向によって出力光導波路を切り替えられる光導波路結合型 HCG-VCSEL への実現に向けた重要な結果であるとともに、通信ネットワークの速度を飛躍的に向上できる光バッファメモリの小型化、また光インターコネクタなどへの応用が期待されるシリコンフォトニクスに向けた新しい光信号処理デバイスにおいても重要な成果である。



## 研究業績

### 原著論文

- (1) N. Yokota, Y. Tsunemi, K. Ikeda, and H. Kawaguchi,  
“Pump probe measurement of electron spin relaxation time in (110)-oriented GaAs/AlGaAs multiple quantum well microposts,”  
Appl. Phys. Express **5**, 122401 (2012).
- (2) Y. Tsunemi, K. Ikeda, and H. Kawaguchi,  
“Lasing-polarization-dependent output from orthogonal waveguides in high-index-contrast subwavelength grating vertical-cavity surface-emitting laser,”  
Appl. Phys. Express **6**, 092106 (2013).
- (3) Y. Tsunemi, N. Yokota, S. Majima, K. Ikeda, T. Katayama, and H. Kawaguchi,  
“1.55- $\mu\text{m}$  VCSEL with polarization-independent HCG mirror on SOI,”  
Opt. Express. **21**, 28685 (2013).
- (4) Y. Tsunemi, K. Ikeda, and H. Kawaguchi,  
"Analysis of optical output characteristics in waveguide coupled HCG-VCSELs,"  
IEICE Trans. Electronics **97**, 2014(to be published).

### 国際学会

- (1) Y. Tsunemi, K. Ikeda, S. Koh, T. Katayama, and H. Kawaguchi,  
“Fabrication of metal coated micro VCSELs”  
The GIST-NAIST-NCTU Symposium, Gwangju, Korea, November 13, 2011.
- (2) Y. Tsunemi, N. Yokota, S. Majima, K. Ikeda, T. Katayama, and H. Kawaguchi,  
“Room Temperature Operation of Optically Pumped 1.55- $\mu\text{m}$  VCSEL with Polarization-Independent HCG Mirror on SOI”  
CLEO 2014 (submitted).

### 国内学会

- (1) 常深 義博, 横田 信英, 池田 和浩, 河口 仁司,  
“光導波路結合型 HCG-VCSEL における結合効率の構造依存性,”

2012年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-4-28, 富山, 2012年9月12日.

- (2) 横田 信英, 常深 義博, 池田 和浩, 河口 仁司,  
“GaAs/AlGaAs(110) MQW マイクロポストにおける電子スピン緩和時間の評価,”  
第73回応用物理学解秋季学術講演会, 14a-H6-2, 愛媛, 2012年9月14日.
- (3) 常深 義博, 横田 信英, 池田 和浩, 河口 仁司,  
“光導波路結合型 HCG-VCSEL における光出力特性の解析,”  
レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 大阪, 2013年1月24日.  
電子情報通信学会技術研究報告, vol. 112, no.398, pp.19-24, 2013.
- (4) 常深 義博, 池田 和浩, 河口 仁司,  
“光導波路結合型 HCG-VCSEL における結合効率の構造依存性 (II),”  
2013年電子情報通信学会 総合大会, C-4-13, 岐阜, 2013年3月20日.
- (5) 常深 義博, 池田 和浩, 河口 仁司,  
“偏光無依存 HCG を用いた光導波路結合型 HCG-VCSEL の光出力特性の解析,”  
第60回応用物理学解春季学術講演会, 29p-B3-20, 神奈川, 2013年3月29日.
- (6) 常深 義博,  
“偏光制御による高機能フォトニックデバイス,”  
第3回先端フォトニクスシンポジウム, 45, 東京, 2013年4月26日.
- (7) 常深 義博, 横田 信英, 間嶋 翔太, 片山 健夫, 池田 和浩, 河口 仁司,  
“SOI 基板上 1.55 $\mu\text{m}$  帯 HCG-VCSEL の光励起レーザ発振,”  
2013年電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-4-18, 福岡, 2013年9月19日
- (8) 常深 義博, 横田 信英, 間嶋 翔太, 片山 健夫, 池田 和浩, 河口 仁司,  
“HCG 領域の形状による偏光無依存 HCG-VCSEL の発振偏光制御,”  
2014年電子情報通信学会 総合大会, C-4-28, 新潟, 2014年3月20日

#### 講演

- (1) 常深 義博  
“光の状態を制御する最先端の光部品の実現を目指して,”  
奈良県立奈良北高等学校における「総合的な学習の時間」, 奈良, 2013年6

月 5 日

## 謝辞

本研究を進めるに当たって、多くの方のご指導、ご助力いただきました。末文ではありますが、ここに感謝の辞を述べさせていただきます。

河口仁司教授には本研究を遂行する上での素晴らしい実験環境を整えていただいたとともに、研究方針、実験方法や実験結果に関する多くのご助言に加えて、学術論文および博士論文執筆、将来の進路におきましても多くのご助言、ご指導、ご支援をいただきました。常に研究がうまくいく方法を一緒になって考えてくださり、私が落ち込むたびに温かい励ましのお言葉をいただきました。私が最も尊敬する研究者、教授であられる河口仁司教授に心より感謝申し上げます。

柳久雄教授には研究を進めるにあたり、様々なご助言とともに励ましのお言葉をいただき、より研究に邁進することができました。また、得られた結果・現象の捉え方など研究を遂行する上で重要となる考え方をご教示いただきました。心より感謝いたします。

浦岡行治教授には研究を進めるにあたり、様々なご助言をいただき研究者としてあるべき思考・姿勢をご教示ただいただけでなく、本研究の背景や重要性を深く考える機会をいただきました。深く感謝いたします。

片山健夫助教には本研究の遂行における装置の使用方法ならびに本論文執筆に関して多大なご助言、ご指導をいただきました。日々の議論においては私が納得できるまで懇切、丁寧にご指導いただいただけではなく、研究者、技術者としての姿勢もご教示いただきました。神経質になりがちな私に、ときには冗談を交えつつ明るく話しかけていただいたことで、常に程よい緊張感を保ちながら研究を遂行することができました。心より感謝申し上げます。

池田和浩助教には本研究の遂行、学術論文の執筆、本博士論文の執筆などに関して深夜、早朝、休日を問わず常に建設的なご助言、ご協力、ご指導をいただきました。また、私生活の相談ごとに関してもご自身の経験をもとに常に勇気づけてくださったおかげで、今日までたどり着くことができました。心から尊敬する研究者であり、ときには兄のような相談相手にもなっていただきました池田和浩助教に心より感謝申し上げます。

黄晋二准教授(現青山学院大学准教授)には、本研究の遂行に当たって、デバイス作製プロセス、輪講による半導体の基礎知識、ならびに実験、研究に向かう姿勢をご指導いただきました。明るく熱心にご指導いただくだけでなく、常に研究や私生活

に至るまで励ましの言葉をいただきました黄晋二准教授に心より感謝申し上げます。

林大介博士研究員には、光学測定に関して様々なご指導、ご支援をいただきました。また、ご自身の経験を交えた社会人としての姿勢、考え方に関するご教授いただきました。感謝申し上げます。

博士後期課程3年の横田信英君にはこの5年間、ともに研究に向かい合い、ともに努力し、ともに議論するだけではなく、常に支えられ、励まされ、勇気づけていただきました。ときには挫けそうになりながらも、ここまでやり遂げることができたのは、人生における良き友人であり、わたしの憧れ、目標とする横田君がいたからこそです。心より感謝申し上げます。

博士前期課程2年の間嶋翔太君には、本研究の主要部分であるHCGの作製や反射率測定に多大な協力をいただきました。また、研究方針を活発に議論できるよき仲間であった間嶋翔太君に心より感謝申し上げます。

前秘書の前川彩美氏、杉田奈穂子氏には出張に関する事務手続きなどでお世話になりました、感謝申し上げます。

最後に、常に優しく見守り、人としての在り方を示し続けてくれた家族、父 俊夫、母 真理子、姉 直子、妹 由紀子、船倉和子様、船倉英子様、心からの感謝を、また共に学生生活を過ごした友人、後輩に深く感謝いたします。