単結晶シリコンを用いたマイクロブリッジ 赤外線光源

解説

キーワード

マイクロマシーニング, 赤外線光源, シリコン, イオン注入,
マイクロブリッジ, 高速電気変調, 異方性エッチング

正員 唐澤 志郎 非会員 大屋 誠志郎
非会員 湯浅 宏康 非会員 秋本 健二
正員 古田 節夫

神奈川県産業技術総合研究所

1. はじめに

マイクロマシーニングにより微小な三次元構造で熱絶縁したマイクロブリッジ光源^{1)-3), 7)-8)}や、イメージングディスプレイ⁴⁾、マイクロヒータ⁵⁾等、マイクロブリッジを応用し微小な放射体をつくる熱型素子の開発が活発に進められている。マイクロブリッジ光源はジュール熱による発熱を利用し発光する。理想的な黒体に近ければ分光放射分布はプランクの熱輻射則に従い、図1のように500℃以上の温度で4 μmより短波にピークを持つ。シリコン一つで広帯域の赤外線光源となり、赤外吸収を利用した各種のガスの検知等多くの用途が期待できる。また、マイクロブリッジの低熱容量化により高速化が可能である。本稿では、マイクロマシーニングを用いてシリコンマイクロブリッジを形成し、高速の電気変調を可能とした小型赤外線光源の開発現状について紹介する。

2. マイクロブリッジ光源の必要性

赤外線ガス検知をはじめ赤外線計測の分野では、広帯域光源としてヒータ光源が多く利用されている。フィラメント型

やグローバ光源が代表例である。これらの光源は熱容量が大きいため、電流を断続しての高速の電気変調動作は困難であり、機械式のチョッパーで光路を遮り変調を行っている。しかし、慣性を利用して安定動作させるため駆動モータも大きくなり計測システムの小型化には適さない。

一方、PbCdS, PbSSe, PbSnSe, PbEuSeTe等のIV-VI族化合物半導体レーザ(LD)は組成比と動作温度を変化させ特定波長での最適化が可能である⁹⁾。しかし、異なった波長域で利用しようとする複数のレーザヘッドを用意する必要がある。またレーザ発振には冷凍器等による冷却が必要となる。発光ダイオードではInAsSbPやGaInAsSbのIII-V族LED光源が報告されている¹⁰⁾。この素子は冷却は不用であるが、現状では高効率化が課題である。これらのLDやLED光源は高速の電気変調動作が可能である。

発熱体に金属の厚膜抵抗体を用いたパルス赤外線光源⁶⁾が報告されている。周波数が48Hzで150℃までの温度変調が可能である。しかし、基板の熱容量が大きく温度変調波形はかなり変形しており、報告の周波数付近がこの光源の電気変調動作の上限になっている。

ヒータ光源やLD/LED、並びに厚膜光源には高速かつ広帯域の光源特性を得ることに限界がある。ヒータ型赤外線光源に代わってマイクロマシーニングによりマイクロブリッジを形成し、高速の電気変調動作により広帯域の赤外線光源を得る試みについて以下に述べる。

3. マイクロブリッジ光源の課題

マイクロブリッジ光源の歴史は1985年のH.Guchelらによるポリシリコンマイクロブリッジ光源にはじまる¹⁾。ポリシリコン光源には、ポリシリコンのフィラメントを真空中で封止し窒化珪素で被覆した2 μmにピーク波長をもつ白熱光源²⁾や酸化膜で被覆したポリシリコン光源³⁾が報告されている。ポリシリコン光源では経時変化の解決が課題である³⁾。

一方、単結晶シリコンを用い赤外線イメージングディスプレイへの応用も試みられている⁴⁾。この応用では各素子から放射される赤外線強度に大きな値は要求されず加熱温度は270℃と低い。発光部を小さくすれば高速電気変調に有利であり、異方性エッチングの歩留まりも向上する。

ガス感知等の計測用光源の場合は、測定感度を上げるため600℃以上の高温にし発光強度を増加させる必要がある。単

図1 黒体の分光放射分布と代表的なガスの赤外吸収波長

Infrared Light Source Made of Single Crystal Silicon Microbridge.
By Shiro Karasawa, Member, Seishiro Ohya, Hiroyasu Yuasa,
Kenji Akimoto Non-member & Setsuo Kodato Member (Kanagawa
Industrial Technology Research Institute).

結晶シリコンマイクロブリッジを用いた赤外線光源⁷⁾では100Hzで700℃以上の温度変調ができる。ここではディスプレイとは逆に発光面積を増加させて、全放射強度を上げる必要がある。面積を大きくして高速に動作させるためブリッジを薄くし熱容量を小さくする方法が必要となる。

4. マイクロブリッジの材料選択

高温・高速で使用するマイクロブリッジの材料選択には、以下の点が要所となる。

- 1) 熱サイクルに対し耐性がある：電流の断続により発熱部の温度は急激に上昇、下降する。動作温度は600℃以上と高温である。このため、高温で変質する材料は光源特性が変化する。ポリシリコン光源では発熱部の伝導特性の経時変化が報告されている³⁾。発熱体材料の候補としては高温で安定であることが必須である。異種材料などの接合構造は膨張係数の差によるストレスが問題となる。
- 2) 高熱伝導率である：立体構造では熱絶縁が向上し、発熱部の温度の上昇速度を大きくできる。しかし、熱絶縁が良いため温度の下降速度は構造的に不利になる。この下降速度は立体構造を形成する材料の熱伝導係数に大きく依存するため、大きな熱伝導率をもつ材料が適している。我々が採用している単結晶シリコンは室温で金属である白金と同程度の熱伝導率をもつ。熱伝導率が高い材料は、発光部内の均一な温度分布の観点からも望ましい。
- 3) 正の温度抵抗係数をもつ：高速電気変調のため電流を高速に断続させる必要がある。負の温度係数の代表として半導体があるが、温度の増加に対して抵抗が低下し、電流が増加する。すると更に温度が上昇して部分的に高温になる。シリコン（SiC）の発熱体は負の温度抵抗係数であるため、フィードバックを用いた電力制御回路が必要となる。このような発熱体の電気制御は難しく発熱部を損傷しやすい。一方、温度係数が正である発熱体は温度上昇に伴って抵抗が増加し、自動的に負のフィードバックがかかり発熱部の過電流による損傷が避けられる。特に素子が多数になった場合、電圧制御で駆動できるため、駆動回路の設計への負担が低減できる利点をもつ。
- 4) 高放射率である：高温の発熱体から放射される赤外線の放射量は材料の放射率により異なる。シリコンは非ドーパでは放射率が低いが高濃度のボロンをドーパすると放射率が增大することが知られている。

5. 単結晶シリコンマイクロブリッジの作製

単結晶シリコンは熱サイクルに対する耐性において最も安定性が期待できる材料である。ここでは光源から見た単結晶シリコンマイクロブリッジの作製技術について述べる。ブリッジの立体加工には、 10^{20}cm^{-3} の高濃度ボロンをドーパしたエッチングストップ層の形成が必要となる¹¹⁾⁻¹³⁾。

高速の電気変調動作が不用な用途の光源には、ブリッジの厳しい厚み制御は要求されず熱拡散法での作製が可能である。熱拡散法ではマイクロヒータの作製が報告されている⁶⁾。

高速の電気変調動作の光源には、低熱容量化のため単結晶シリコンブリッジの厚み制御が必要となる。 $1\mu\text{m}$ 付近のブ

リッジ厚の制御のためには濃度と濃度プロファイルを独立に制御可能なイオン注入技術が有効である^{7),8)}。イオン注入技術では熱拡散法($3\mu\text{m}$ 厚⁵⁾)に比べ $1.5\mu\text{m}$ と薄いブリッジを形成できる。

異方性エッチングのエッチャントとして、ヒドラジン、EDP、KOH、アンモニアが報告されている。ブリッジの厚み制御には不純物濃度のレベルが重要となる。異方性エッチングの不純物濃度依存性についてEDPで詳細な報告がある¹¹⁾。110℃の温度において(100)面のエッチングレートはボロンの不純物濃度が 10^{19}cm^{-3} 近くから減少しはじめ $2\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ ではじめの 1.4×10^{-4} となる。アンモニアではこの値は $1.3\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ で 1.25×10^{-4} となる¹²⁾。この選択比により高濃度ボロンはエッチングストッパーとなる。酸化膜をマスクとする時、報告値¹¹⁾⁻¹³⁾と比較するとアンモニアに対するマスクのエッチングレートは $0.6\text{\AA}/\text{分}$ で最も小さい。発光面積を必要とする赤外線光源のブリッジ形成には、濃度レベル、選択比、マスクの耐性の点でアンモニアが有利と考えられる。

6. 単結晶シリコンマイクロブリッジ赤外線光源

赤外線光源としての詳細な特性を報告した論文は少ない。以下では著者らが開発した単結晶シリコンマイクロブリッジ赤外線光源^{7),8)}について述べる。

6.1 特徴

- 1) 熱サイクルに対する耐性において最も安定性が期待されるモノリシックの単結晶シリコンから構成されている。
- 2) シリコンの熱伝導率は 1.56mW/K と良好であり、温度下降速度が大きい。
- 3) 温度抵抗係数は正であり、電流に対し負のフィードバックがかかるため、過電流による発熱部の損傷が避けられる。
- 4) 金属転移レベルまで高濃度のボロンがドーパされているため、放射率が非ドーパシリコンよりも大きい。

写真1 発光中の単結晶シリコンマイクロブリッジ赤外線光源

図2 光源素子の断面構造

6.2 素子構造

写真1に発光中の単結晶シリコンマイクロブリッジ赤外線光源の顕微鏡写真、図2に光源素子の断面構造を示す。輝度の高い放射領域の面積は $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 、ブリッジサイズは $650 \times 200 \mu\text{m}^2$ である。光源の発熱部分、電極部分をイオン注入により高濃度ボロンをドーパし、これを異方性エッチングのストッパーとして用いると同時に、発熱部をヒートシンク部と熱絶縁したマイクロブリッジを形成する。異方性エッチングでは、高濃度ボロンの領域と(111)面がエッチングがされにくく、ブリッジと橋梁下の側壁を(111)面で囲まれた堀が形成される。発熱部、電極部、ヒートシンク部はモノリシックのシリコンにより構成されている。

6.3 光源特性

a)電気応答性： 単結晶シリコンマイクロブリッジ部の抵抗は室温で20-30 Ω であり、温度-抵抗係数は高濃度のボロンドーパシリコンのため金属的であり正になっている。このため電圧印加時には温度が上昇するとともに、ブリッジ部の抵抗が増加し、流れる電流が急速に減少し温度が安定する。このように負のフィードバックがかかるため、簡単な電圧制御のみで光源素子を駆動できる。これにより温度-抵抗特性が負の光源に必要な複雑な制御回路は不用となる。

b)赤外線放射特性： InSbとHgCdTe検出器を用い分光放射計により1.35-14.49 μm の相対放射強度分布を測定した結果を図3に示す。500℃に加熱した高濃度ボロンドーパシリコンからの放射強度分布は4 μm 付近にピーク波長をもつ。

c)温度応答特性： 素子の放射温度測定には、検出器にInSbを用いた顕微鏡型赤外線放射温度計が有効である。50Hzで矩形波の電圧を入力した時の温度の時間変化を図4に示す。温度は電圧印加時に急速に上昇して安定し、電圧 off 時に急速に下降する。温度上昇時の光源素子の熱時定数は1msec以下であり速い応答性をもつ。100Hzの正弦波電力の投入に対する発熱部ピーク温度は投入電力に比例し増加する。150mWの投入電力だけで発熱部は780℃になる。

d)温度変調特性： 投入電力周波数に対する温度変調の変化を図5に示す。ここで入力電圧波形は正弦波であり、発熱部の温度変化の最高値と最低値の差を温度変調とした。周波数が100Hz以下では700℃以上の温度変調がきでる。1kHzでの温度変調は100℃以上である。このように周波数の増加とともに温度変調は減少する。650x200 μm^2 の素子では動作周波数は10kHzまでであった。1kHzでの温度変調波形を図6に示す。金属厚膜では温度変調波形の歪みは大きい、単結晶シリコンブリッジ光源ではほとんど波形歪みは見られない。

ブリッジ部の面積が650x200 μm^2 の光源素子の性能は次のとおり。1) 50Hzの電圧矩形波印加時の熱時定数は1msec以下である。2) 150mWの投入電力でマイクロブリッジは780℃に加熱される。3) 100Hzの電力周波数での温度変調は700℃以上である。4) 1kHzの電力周波数での温度変調は100℃以上である。5) 700mWの投入電力でマイクロブリッジは1100℃に加熱されるが、バーンアウトは観測されて

図3 高濃度ボロンドーパシリコンの相対放射強度分布

図4 温度応答特性

図5 温度変調幅の周波数依存性

図6 1kHzでの温度変調波形

いない。面積が $365 \times 85 \mu m^2$ の光源素子⁸⁾では1) 200Hzの電力周波数での温度変調は700℃以上である。2) 2.5kHzの電力周波数で温度変調は100℃以上である。

7. おわりに

単結晶シリコン赤外線光源は、高速かつ広帯域の光源特性が得られる点で従来にない光源特性を与えている。また、駆動電気信号波形による波形歪みの少ない温度変調が可能である。高速の電気変調を生かし機械駆動をなくすことによりガス検知器の光源機構部は数十分1の小型化が期待できる。

(平成9年2月14日受付)

文 献

- 1) H. Guckel and D. W. Burns, "Integrated transducers based on black body radiation from heated polysilicon filaments," *Transducers'85*, 364-366 (1985).
- 2) C.H. Mastrangelo and R.S. Muller, "Vacuum-sealed silicon micromachined incandescent light source," *Tech. Digest of International Electron Devices Meeting*, 503-506 (1989).
- 3) M. Parameswaran, A.M. Robinson, D.L. Blackburn, M. Gaitan and J. Geist, "Micromachined thermal radiation emitter from a commercial CMOS process," *IEEE Electron Device Letters*, 12, 57-59 (1991).
- 4) L. Burriesi and D. Keezer, "A dynamic RAM imaging display technology utilizing silicon blackbody emitters," *SPIE*, Vol. 765, 112-122 (1987).
- 5) M. Kimura and K. Komatsuzaki, "Microheater made of heavily boron doped single crystal silicon beam," *Tech. Digest of the 11th Sensor Symposium*, 169-172 (1992).
- 6) D. W. Knodle, P. Graham and J.O. Sams, "Optimization of a thick film resistor for use as a pulsed infrared emitter," *SPIE* Vol. 1338, 102-110 (1990).
- 7) H. Yuasa, S. Ohya, K. Akimoto, S. Karasawa and S. Kodato, "Infrared light source made of heavily doped single crystal silicon microbridge," *Tech. Digest of the 14th Sensor Symposium*, 113-116 (1996). *Trans. IEE of Japan*, to be published.
- 8) H. Yuasa, S. Ohya, S. Karasawa, S. Kodato, and K. Akimoto, "Transient thermal analysis of micromachined silicon bridge," *SPIE* Vol. 2880, 280-287 (1996).
- 9) H. Preier and R. Grisar, "Application of semiconductor radiation detectors and diode lasers for infrared spectroscopy," *Measurement* Vol. 3, 153-160 (1985).
- 10) Y.P. Yakovlev, A.N. Baranov, A.N. Imenkov, and M.P. Mikhailova, "Optoelectronic LED-photodiode pairs for moisture and gas sensors in the spectral range 1.8-4.8 μm ," *SPIE* Vol. 1510, 120-127 (1991).
- 11) N.F. Raley, Y. Sugiyama, and T. Van Duzer, "(100) silicon

etch-rate dependence on boron concentration in ethylenediamine-pyrocatechol-water solutions," *J. Electrochem. Soc.* Vol. 131, 161-171 (1984).

12) U. Schnakenberg, W. Benecke and B. Loechel, "NH₄OH-based etchants for silicon micromachining," *Sensors and Actuators*, A21-23, 1031-1035 (1990).

13) K.E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," *Proc. IEEE*, 70, 420-457 (1982).

唐澤志郎 (正員) 1947年9月11日生まれ。78年筑波大学

物理学専攻博士課程修了。理学博士。神奈川県産業技術総合研究所勤務。光素子プロジェクトチームリーダー。光素子、センサ、薄膜、エキシマレーザ応用に関する研究に従事。応用物理学学会会員。日本分光学会会員、同会常務委員。

大屋誠志郎 (非会員) 1963年3月20日生まれ。85年東京

都立大学物理学科卒業。神奈川県産業技術総合研究所勤務。光素子プロジェクトチームメンバー。超伝導デバイス、酸化物薄膜、レーザアブレーションに関する研究に従事。日本物理学会、応用物理学学会会員。

湯浅宏康 (非会員) 1967年10月16日生まれ。90年東京理

科大学物理学科卒業。神奈川県産業技術総合研究所勤務。光素子プロジェクトチームメンバー。マイクロマシンングに関する研究に従事。

秋本健二 (非会員) 1949年5月25日生まれ。73年東京理

科大学物理学科卒業。現在光明理化学工業(株)勤務。神奈川県産業技術総合研究所協力研究員。赤外線ガス検知システムに関する研究に従事。

古田士節夫 (正員) アンリツ(株)研究所勤務。工学博士。

93-95年室蘭工業大学客員教授。95-96年神奈川県産業技術総合研究所客員研究員。95-東海大学講師(非常勤)。半導体デバイス、フレキシブルセンサに関する研究に従事。電子情報通信学会、応用物理学会、IEEE会員。本会E部門編集委員。おいしい水の識別センサ調査専門委員会幹事。