GeSi/Siヘテロ接合赤外線受光素子

正員 和田英男、非会員 菅野俊雄、非会員 長嶋満宏、非会員 打越政弘
(防衛庁技術研究本部第二研究所)

非会員 油谷直毅、非会員 松原俊夫、非会員 中西淳治、

非会員 熊田祐昌、正員 木股雅章 (三菱電機)

GeSi/Si Heterojunction Infrared Photodetector

Hideo Wada, Member, Toshio Kanno, Non-member, Mitsuhiro Nagashima, Non-member

Masahiro Uchikoshi, Non-member (2nd Research Center, TRDI, Japan Defense Agency)

Naoki Yutani, Non-member, Toshio Matsubara, Non-member, Junji Nakanishi, Non-Member,

Norimasa Kumada, Non-member, Masafumi Kimata, Member (Mitsubishi Electric Corporation)

Monolithic structures, in which the photodetectors are combined with signal multiplexers without bump bonding technology, are beneficial in order to manufacture high resolution infrared focal plane arrays and reduce their production cost. The GeSi/Si heterojunction photodetector can be easily integrated monolithically on Si multiplexers and is one of the most promising infrared detectors for high resolution focal plane arrays detecting the infrared image in the 10- μm spectral band. We have fabricated GeSi/Si heterojunction photodetectors by MBE technology and evaluated their photoresponse and dark current, and investigated the feasibility of the GeSi/Si heterojunction infrared focal plane array. The quantum efficiency has a maximum value at a GeSi thickness of 20 nm and the cutoff wavelength can be tailored by the composition of the GeSi film. It was confirmed that the cutoff wavelength can also be controlled by the impurity concentration in the GeSi film. The dark current exhibited an ideal thermionic emission characteristic in a wide temperature range. The performance obtained in the preliminary experiments indicates that the GeSi/Si heterojunction technology has sufficient capability in realizing focal plane arrays with full TV resolution for the 10- μm infrared spectral band.

キーワード：GeSi、ヘテロ接合、赤外線受光素子、MBE

1. はじめに

現在、実用化されている赤外線撮像システムのほとんどは、赤外線受光素子を1次元に配列して、鏡を機械的に動かすことにより画像を得る機械走査タイプであり、この方式では高感度化、高信頼性化及び小型化に限界がある。そこで、これらの問題を克服するために、赤外線受光素子を2次元に配列し電子走査を行なう赤外線イメージセンサ (FPA: Focal Plane Array) が、初め3~5 μm 帯用として、次に10 μm 帯用として開発されてきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

10 μm 帯用の受光素子としてはHgCdTeを用いたものが開発の中心となっていたが、こうした化合物半導体を用いた場合、受光部とそこで得られた信号を外部に送り出す信号転送部とを別の半導体で造る必要があり、二つの半導体基板を金属電極 (パンプ) で張り合わせたハイブリッド構造を採らなければならない。量子型のFPAの動作温度は約-190℃と低温であり、このハイブリッド構造では冷却時に二つの半導体基板間の熱膨張係数の差によってパンプと基板との接合部に大

きな熱歪が発生する。この熱歪は基板の面積、言い換えれば画素数が増加するほど大きくなるため、ハイブリッド方式では多画素化に限界があると考えられてきた。

最近、この問題を解決するためにシリコン上にモノリシックに集積できるGeSiヘテロ接合受光素子及びこの受光素子を用いた2次元赤外線FPAが報告され注目を集めている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。GeSiヘテロ接合受光素子は3-5 μm 帯で高解像度化の牽引役を果たしているPtSiショットキバリア受光素子と同じ動作原理で動作するがカットオフ波長を調整することができ10 μm 帯にも適用可能である。

われわれは、GeSiヘテロ接合受光素子によるモノリシック構造の高解像度10 μm 帯赤外線FPAの開発の一環としてMBE技術を用いてGeSiヘテロ接合を作製するとともに、GeSi膜厚、組成比、GeSi中の不純物濃度などの製造パラメータがGeSiヘテロ接合受光素子の特性に及ぼす影響を調べた。本論文では、試作した受光素子の特性を示すとともに、製造パラメータによりカットオフ波長の調整が可能であることを示す。

2. 受光素子の構造と動作

図1にGeSiとp形Siのヘテロ接合受光素子の構造とその動作を説明するエネルギーバンド図を示す。GeSiは、半導体デバイスに多用されているGeとSiの混晶であり、GeとSiの組成比を変えることによりエネルギー・バンド・ギャップを連続的に変化させることができる。GeSi層は電荷を放出するエミッタの役目を果たす部分で、赤外線吸収効率を上げるためにp形不純物であるB（ボロン）を極めて高濃度にドーピングする。そのため、フェルミ・レベルが価電子帯内に侵入した縮退状態となり、低温においても自由キャリアとして多量の正孔が価電子帯上部に局在している。この状態のGeSi層に赤外線を入射させると、赤外線のエネルギーにより正孔が励起され、励起された正孔のうちヘテロ接合界面に形成されたエネルギー障壁（ ϕ_b ）を越えることのできる正孔がSi中に放出され信号電流となる。この動作はショットキバリア受光素子と同じ内部光電子放出機構と呼ばれるものである。赤外線の入射は受光素子表面と裏面どちら側からも行なうことができる。

受光素子で検出できる光の最大波長であるカットオフ波長 λ_c はエネルギー障壁で決まり、 λ_c を μm 、 ϕ_b をeVで与えたとき次式で表される。

$$\lambda_c = \frac{1.24}{\phi_b} \quad (1)$$

ϕ_b はGeSi層のGeとSiの組成比（GeSiとSiのバンドギャップの差のほとんどは価電子帯のオフセットとなる）とGeSi層中のB濃度で変化し（B濃度によりGeSi層のフェルミ・レベルの位置が変化する）、製造条件により制御可能である。

信号電荷のエミッタがショットキバリア受光素子の場合、準位が連続的に広がった金属であるのに対し、ヘテロ接合受光素子の場合準位が局在した半導体であるので、キャリアがバリアを越えるエネルギー状態に励起される確率が高くなり、ショットキバリア受光素子に比べ高い量子効率を得られる可能性がある。ヘテロ接合受光素子の量子効率 η はエミッタとなる半導体内でのキャリアの運動が等方的と考えられる場合次式のように表される⁶⁾。

図1 GeSiヘテロ接合検出器の構造と動作

Fig.1. Structure and operation of GeSi heterojunction detector.

$$\eta = C'_i \frac{(h\nu - \phi_b)^2}{\sqrt{h\nu}} \quad (2)$$

ここで、 h はプランク定数、 ν は光の振動数である。 C'_i はショットキバリア受光素子の量子効率を与える式の量子効率係数に相当する定数である。

量子型の赤外線受光素子では暗電流を低減し十分なS/Nを得るために素子を冷却している。素子の動作温度は受光素子の暗電流の温度依存性を考慮して決定される。ヘテロ接合受光素子の暗電流はショットキバリア受光素子の暗電流と同じようにthermionic emission電流が支配的であり、一般に受光素子として使用される逆方向バイアス状態では次式のように表される⁶⁾。

$$J_D = A T^2 \exp\left(-\frac{\phi_b}{kT}\right) \quad (3)$$

ここで、 J_D は逆方向電流密度、 A はリチャードソン定数、 T は素子温度、 k はボルツマン定数である。

3. 受光素子の作製と評価

受光素子は基板濃度が約 10^{16} cm^{-3} の面方位(100)のp形Si基板上に作製した。Si基板上に素子間分離用に厚いシリコン酸化膜を形成し、基板とオーミックコンタクトをとるためのp形高濃度不純物領域とガードリングとなるn形高濃度不純物領域を形成した後、GeSi薄膜を結晶成長してヘテロ接合を作製する（図1参照）。

今回採用した結晶成長法は固体ソースを用いたMBE（Molecular Beam Epitaxy）法である。蒸着源はSi、Ge、Bの3種であるが、このうち融点の高いSiは電子ビーム加熱による蒸着を行い、Geはクヌーセンセルを用いて蒸着している。Bについては融点の低い化合物を材料としてクヌーセンセルを用いてドーピングした。MBEを行う前、接合を形成すべき部分にSi清浄表面を露出する必要があるが、今回は大気中で表面の化学処理を行いシリコン酸化膜を薄く形成した後、MBE成長室で基板を700～900℃に昇温しシリコン酸化膜を昇華させる方法を採用した。GeSi膜形成時の基板は400～600℃で、成長速度は0.5 nm/sec以下である。GeSiの膜厚は10～50 nmの範囲で変化させ、組成比はGeとSiの蒸着レートを制御することで変化させた。GeSi中のB濃度は量子効率とカットオフ波長に影響を与える。今回の研究ではB濃度は $1 \times 10^{19} \sim 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の範囲で変化させた。

形成したGeSi膜は写真製版で受光部となる部分のみレジストで保護してドライエッチングによりパターニングした。パターニングしたGeSi膜と基板へのオーミックコンタクト部分に金属配線を行い受光素子が完成する。受光素子のサイズは $400 \times 600 \mu\text{m}^2$ である。今回の研究では入射面の反射防止膜および光学的共振構造は形成していない。

分光感度測定は校正された黒体炉を光源として、狭バンドの干渉フィルタで分光する方法を採用した。受光素子の冷却はHeのソルベサイクル冷凍機で行った。光の入射は受光素子裏面から行い、分光感度特性測定時の素子温度は40Kとした。暗電流測定では素子は素子とほぼ同じ温度に保持された遮光版で入射面を塞いでいる。暗電流測定における温度制御は冷凍機のコールドヘッドと素子の間に設けたヒータに投入する電力を制御することにより行なった。

4. 評価結果と考察

(1) 結晶性評価

結晶性に関してはRHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction)、TEM (Transmission Electron Microscope)、X線回折により評価した。

図2にMBE装置内で成長中のGeSi薄膜から得られたRHEEDパターンを示す。RHEEDパターンは薄膜最表面の原子配列の秩序性を示すもので、今回試作した薄膜からのパターンがストリーク・パターンを示していることからGeとSi

図2 GeSi薄膜のRHEED像。
Fig.2. RHEED pattern from GeSi film.

図3 GeSi薄膜の断面TEM像
Fig.3. Crosssectional TEM image of GeSi film.

図4 Si上のGeSi薄膜のX線回折パターン。
Fig.4. X-ray diffraction pattern of GeSi film on Si substrate.

図5 歪みを持ったSi上のGeSi薄膜の構造。
Fig.5. Strained structure of GeSi film on Si substrate.

原子が規則正しく配列していて、薄膜が良好な結晶性を保ちながら成長していることが分かる。

図3はSi基板とGeSi薄膜界面の原子配列を示す断面TEM像である。写真で白い点が格子位置に対応しており、GeSi薄膜がSi基板の格子に整合した形で結晶の乱れなく成長していることが分かる。

図4はGeの組成が0.18のX線回折パターンである。回折角69度付近の強い信号と、そのすぐ低角側にある弱い信号はSi基板からのもので、GeSi層からの信号はさらに低角側のAで示した位置に検出されている。GeSi薄膜をSi上に形成すると、GeSiは一般に図5に示すようにSi基板に格子を整合させて歪んだ状態で成長する。良好なヘテロ接合受光素子を得るためには、この歪んだ状態でのGeSiの成長が不可欠であるが、成長温度、膜厚、組成などの製造条件により歪みが緩和し界面に不整合が生じる場合がある。図4でBで示したのはGeの組成比が0.18の無歪み状態でのGeSiの格子定数0.55 nmに相当する回折角である。今回試作したGeSiから得られた回折角がこれより低角側になっているのは、厚み方向の格子定数が無歪み状態より大きくなっており、GeSi薄膜が図5に示した歪み状態になっていることを示している。

(2) 量子効率のGeSi膜厚依存性

ショットキバリア受光素子と同じようにGeSiヘテロ接合受光素子の量子効率もエミッタ層の膜厚に大きく依存する。この膜厚依存性はエミッタ層における赤外線の吸収の効果と、励起されたホットキャリアのエミッタ層内での多重反射によ

図6 量子効率のGeSi膜厚依存性.

Fig. 6. Dependence of quantum efficiency on GeSi Thickness.

る量子効率増大効果を考慮することで説明することができる。膜厚の極めて薄い領域では前者の効果が支配的であり、膜厚の増大とともに量子効率は増大し、膜厚が厚くなると後者の効果が支配的となり、量子効率は膜厚とともに減少する⁹⁾。従って、GeSiヘテロ接合受光素子では量子効率が最大となる最適GeSi膜厚が存在する。本研究では、受光素子作製実験の第一段階としてGeSi膜厚の最適化を実施した。

Ge組成比を0.35とした時の波長8.65 μm における量子効率のGeSi膜厚依存性を図6に示す。B濃度は $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 一定としている。量子効率は膜厚20nmまでは急激に増大し、それより膜厚の厚い領域で緩やかに減少することが分かった。

(3) 組成比依存性

上述の実験で得られた最適膜厚20nmに膜厚を固定し組成比を変化させて、組成比によるカットオフ波長の制御を試みた。試料はGeの組成が0.35、0.40、0.45の3種作製した。B濃度は $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 一定としている。逆方向バイアスが1Vの時の分光感度特性の測定結果を図7に示す。分光感度特性は式(2)から予想されるように量子効率が波長の増大とともに減少しており、Ge組成が小さいほど長波長まで感度を有している

図7 分光感度特性のGe組成依存性.

Fig. 7. Dependence of spectral response on Ge fraction.

図8 バリア高のGe組成依存性.

Fig. 8. Dependence of barrier height on Ge fraction.

ことが分かる。図8に測定結果を式(2)にフィッティングして得られるバリア高 ϕ_b のGe組成依存性を示す。このバリアに相当するカットオフ波長 λ_c はGe組成が0.35、0.40、0.45に対しそれぞれ22、17、12 μm となる。また、量子効率係数 C_1 は0.2 eV^{-1} 前後の値が得られており、Ge組成比が小さくなるほど大きくなる傾向が見られた。この傾向は文献(6)に示された C_1 のバリア高依存性と定性的に一致する。

(4) 暗電流特性

上に述べた実験で分光感度特性を評価した素子と同じ素子について暗電流の温度特性評価を実施した。逆方向バイアスは1Vである。結果を図9に示す。図に見られるように広い温度範囲で式(3)に従うthermionic emission電流の特性を示している。図の傾きから得られるバリア高は、分光感度特性から得られる値にほぼ一致する。リチャードソン定数は $30 \sim 40 \text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ で、p形Si中の正孔に対し妥当な結果となっている。

図9 暗電流の温度依存性.

Fig. 9. Dependence of dark current on temperature.

(5) B濃度依存性

図10はGeSi膜厚を20 nm一定、Ge組成比を0.35一定の場合のGeSi中に含まれるB濃度とバリア高の関係を示す実験結果である。B濃度が増加するとGeSi中のフェルミ・レベルが価電子帯のより低い位置に移動するのでバリア高 ϕ_b は小さくなる。バリア高の低下はカットオフ波長の増大を意味し、B濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ から $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の範囲でカットオフ波長としては $5.5 \mu\text{m}$ から $41 \mu\text{m}$ まで制御可能であることが分かった。図11に量子効率係数 C_1 のB濃度依存性を示す。この受光素子の光吸収メカニズムはGeSi中の自由キャリア(正孔)吸収によるもので⁽¹⁰⁾、GeSi中での光の吸収量はGeSi中に導入された不純物のうち活性化されたものの濃度に依存する。今回得られた結果は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ までは量子効率係数がB濃度の増大とともに大きく増大しており、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上では飽和の傾向を示している。これは $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上では導入したBの活性化率が下がっているためと考えられる。

図10 バリア高のB濃度依存性。

Fig.10. Dependence of barrier height on B concentration.

図11 量子効率係数のB濃度依存性。

Fig.11. Dependence of quantum efficiency coefficient on B concentration.

5. まとめ

GeSiヘテロ接合受光素子の試作・評価を行い、この受光素子を用いたモノリシック高解像度 $10 \mu\text{m}$ 帯赤外線FPAの実現性の検討を行なった。

固体ソースを用いたMBEでSi基板上に結晶性の良い歪みGeSi薄膜を形成することができた。GeSiヘテロ接合受光素子の量子効率係数はGeSi膜厚が20 nmの時最大となり、そのカットオフ波長はGeSi薄膜中のGeの組成とB濃度により制御することができる。暗電流は理想的なthermionic emission電流の特性を示した。量子効率はGeSi膜中のB濃度に大きく依存する。

今回得られた結果は、GeSi受光素子のカットオフ波長が製造パラメータを選ぶことで $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 帯FPAに適した範囲で制御可能で、蓄積モード動作を前提に考えると対象とする波長範囲で十分な量子効率を実現できることを示している。

(平成8年4月8日受付、平成8年9月25日再受付)

文 献

- (1) 菅野、風間、溝上、内山、打越、角田、星野: "赤外センサ(II) 3~5 μm 帯2次元アレイ検知器", 防衛庁技術研究本部技報、第996号、1987.
- (2) 菅野、佐賀: "64x64画素10 μm 帯2次元アレイ赤外線検知器", 防衛庁技術研究本部技報、第6301号、1992.
- (3) T. Kanno, M. Saga, A. Kawashima, R. Oikawa, A. Ajisawa, Y. Tomioka, N. Oda, T. Yamagata, S. Murashima, T. Shima, and N. Tasuda: "Development of MBE-grown HgCdTe 64x64 FPA for long-wavelength IR detection", Proc. SPIE, vol. 2020, pp. 41 - 48, 1993.
- (4) T. Kanno, H. Wada, M. Nagashima, H. Wakayama, K. Awamoto, N. Kajihara, Y. Ito, M. Nakamura: "256x256 element HgCdTe hybrid IRFPA for 8- to 10- μm band", Proc. SPIE, vol. 2552, pp. 384-391, 1995.
- (5) T. L. Lin, A. Ksendov, E. W. Dejewski, R. W. Fathauer, T. N. Krabach, and J. Majserian: "A novel Si-based LWIR detector: The GeSi/Si heterojunction internal photoemission detector", Tech. Digest of IEDM, pp. 641 - 644, 1990.
- (6) B-Y. Tsaur, C. K. Chen, and S. A. Marino: "Long-wavelength $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ /Si heterojunction infrared detectors and focal plane array", Proc. SPIE, vol. 1540, pp. 580 - 595, 1991.
- (7) T. L. Lin, T. George, E. W. Jones, A. Ksendov, and H. L. Huberman: "Elemental boron-doped p⁺-SiGe layers grown by molecular beam epitaxy for infrared detector applications", Appl. Phys. Lett., vol. 60, pp. 380 - 382, 1992.
- (8) S. M. Sze: "Physics of Semiconductor Devices" (John Wiley & Sons, Inc.), pp. 378 - 381, 1969.
- (9) H. Elabd and W. F. Kosonocky: "Theory and measurements of

photoresponse for thin film Pd_2Si and PtSi infrared Schottky-barrier detectors with optical cavity", RCA Review, vol. 43, pp. 569 - 589, 1982.

- (10) T. L. Lin, E. W. Jones, T. George, A. Ksendzov, and M. L. Huberman: "Advanced Si IR detectors using molecular beam epitaxy", Proc. SPIE, vol. 1540, pp. 135 - 139, 1991.

和田英男 (正員) 1957年10月9日生まれ。80年3月防衛大学校理工学部電気工学科卒業。同年4月防衛庁陸上自衛隊勤務。85年3月防衛大学校理工学研究科物理学卒業。88年8月三井金属鉱業(株)総合研究所研究員。93年4月防衛庁技術研究本部第2研究所3部光波第4研究室主任研究員。現在に至る。現在赤外線検知素子および材料の研究に従事。工博。

菅野俊夫 (非会員) 1940年2月15日生まれ。63年3月東北大学工学部電気工学科卒業。64年4月防衛庁技術研究本部入庁。技術研究本部第2研究所において、赤外線受光素子の材料・デバイスの研究開発、53年より二次元アレイ赤外線検知器の研究開発に従事。現在、第2研究所第3部光波システム研究室長。

長嶋満宏 (非会員) 1964年2月15日生まれ。90年3月東京大学理学部物理学卒業。92年4月防衛庁技術研究本部入庁。技術研究本部第2研究所にて、赤外線受光素子の材料・デバイスの研究開発に従事。現在、第2研究所第3部光波第4研究室員。

打越政弘 (非会員) 1960年2月11日生まれ。83年3月熊本大学工学部電気工学科卒業。84年4月防衛庁技術研究本部入庁。86年熊本大学大学院情報工学修士課程修了。技術研究本部第2研究所にて、赤外線受光素子の材料・デバイスの研究開発、二次元アレイ赤外線検知器の研究開発に従事。92年東京工業大学博士課程修了。95年4月熊本工科大学短期大学に勤務。

油谷直毅 (非会員) 1956年12月20日生まれ。81年3月大阪大学基礎工学研究科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。主としてPtSiショットキバリア赤外線FPAの研究開発に従事。現在、同社先端技術総合研究所機能デバイス部試作技術グループマネージャ。

松原俊夫 (非会員) 1964年7月10日生まれ。89年3月富山大学工学研究科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。主として10 μm 帯赤外線FPAの研究開発に従事。現在、同社先端技術総合研究所機能デバイス部赤外線イメージセンサグループに所属。

中西淳治 (非会員) 1961年4月3日生まれ。88年3月早稲田大学工学研究科修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。主としてPtSiショットキバリア赤外線FPAの研究開発に従事。現在、同社先端技術総合研究所機能デバイス部赤外線イメージセンサグループに所属。

熊田 祐昌 (非会員) 1965年8月30日生まれ。88年3月北海道大学工学部応用物理学卒業。同年三菱電機(株)入社。主として赤外線撮像装置の開発に従事。現在、同社鎌倉製作所EO事業開発センター技術第一課の所属。

木股 雅章 (正員) 1951年4月20日生まれ。76年3月名古屋大学電子工学研究科卒業。同年三菱電機(株)入社。主としてPtSiショットキバリア赤外線FPAの研究開発に従事。現在、同社先端技術総合研究所機能デバイス部赤外線イメージセンサグループマネージャ。工博。