

3-2 検出器

3-2 Detector

3-2-1 量子井戸型テラヘルツ帯検出器

3-2-1 Terahertz Frontside-Illuminated Quantum Well Photodetector

パトラシン ミハイル 寶迫 巖

Mikhail Patrashin and HOSAKO Iwao

要旨

正面入射の GaAs/AlGaAs 量子井戸型検出器について実証した。この検出器は目的ピーク周波数を 3 THz とする量子井戸 (QW) のサブバンド間吸収を利用する。多量子井戸構造は、2 % のアルミニウム合金含有量を持つ 80 nm バリアによって隔てられた 18 nm QW が、20 回反復することによって構成されている。暗電流、レスポンスビティ及び分光感度の特性を測定した。40 mV のバイアス電界及び 3 K の動作温度において、13 mA/W のレスポンスビティが得られた。また、ピーク応答は設計上の検出周波数に近かった。暗電流密度は数 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、量子バリアの熱アシストトンネリングによる制約を受けた。素子性能の最適化を実現するための設計についても考察した。

We have demonstrated the operation of a frontside-illuminated GaAs/AlGaAs quantum well photodetector based on intersubband absorption in a quantum well (QW) with a targeted peak frequency of 3 THz. A multiple quantum well structure consists of 20 periods of 18 nm QWs interleaved by 80 nm barriers with an Al alloy content of 2 %. We measured the following performance characteristics: dark current, responsivity, and spectral response. A responsivity of 13 mA/W at an electric bias of 40 mV and an operating temperature of 3 K was obtained with a peak response close to the designed detection frequency. The dark current density was a few $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ and was limited by thermally assisted tunneling through the barriers. We looked also at possible designs to optimize the device's performance.

[キーワード]

テラヘルツ, 量子井戸型検出器, サブバンド間遷移

Terahertz, Quantum well photodetector, Intersubband transition

近年、テラヘルツ (THz) 帯放射の実用的発生源及び検出器を開発する作業が続けられている[1]-[9]。テラヘルツイメージング、分光分析及び通信といった今後の応用分野では、直接検出法及びヘテロダイン検出法が使用されると考えられる。この方法では、適切なテラヘルツ放射発生源と高速・高感度の多素子検出器が必要となる。従来、テラヘルツ帯スペクトルの検出器は選択肢がかなり限られていた。しかし現在では、1~2 THz 未満に

おけるヘテロダイン受信器ミキサの性能が大幅に向上している。具体的には、超伝導-絶縁帯-超伝導 (SIS) トンネル接合や超伝導ホットエレクトロンポロメータ (HEB) などがある[7][8]。一部の用途では、それより高周波側に対して外因性半導体を用いた、有用な光子検出器が幾つか存在する。例えば、外因性 Ge:Ga 光検出器の直接検波は、同じ温度で動作する超伝導ポロメータに比べて、感度が数けた分上回っている[9]。

検出器において大きな進展はあったものの、実用的なイメージングに必要な大型アレイ検出器はいまだに実現されていない。現在の方式を飛躍的に改善及び進歩させたとしても、必要な条件を達成できないか、もしくは極端に高価となる可能性がある。この場合、新たな素子コンセプトや材料を検討する価値がある。

GaAs/AlGaAs などの化合物半導体によって得られる、信頼性が高く定評のある物質系は、目的のスペクトルレンジを持つ量子井戸型検出器の作製に使用できる。この素子の動作は量子井戸 (QW) におけるサブバンド間吸収に基づくため、QW 層に対して適切な幅を選択し、かつバリア層の金属化合物に対して適切な組成を与えることによって適切なバンド構造が実現する。この素子は最近まで、主として近赤外や中赤外素子に使用されていた。その加工技術は完全に成熟しており、最大 1024×1024 ピクセルの大型赤外線検出器アレイが既に実証されている [10]。暗電流が最低レベルとなる QW 検出器の最適設計は、量子井戸における最初の励起状態がバリアの最上レベルと一致する (準束縛状態に拘束される) 状況に対応する。同様の方法を $1 \sim 8$ THz の範囲に適用すれば、QW 構造のパラメータはバリアではアルミニウム含有量が数パーセント ($1 \sim 5\%$)、QW の幅が $10 \sim 30$ nm となる [5]。

サブバンド間共鳴周波数が 3 THz (波長: 約 $100 \mu\text{m}$) である QW 構造のバンド図を図 1 に示す。この構造は、18 nm の GaAs QW と 80 nm の AlGaAs バリア (アルミニウム化合物含有量は 2%) で構成されている。サブバンド間吸収を活

性化するため、井戸の中心に Si をドーピングしている。これは QW の基底サブバンド E_1 を占める。バリアは非ドーピングである。検出器サンプルでは、 $0.4 \mu\text{m}$ の上部電極層と $0.8 \mu\text{m}$ の下部電極層の間に、このような QW が 20 個挟持されている (図 2)。

不純物濃度は、 E_1 が必ず、ほぼ完全に占有されるように選択することにする。ここで、占有状態のサブバンドが一つだけで、かつ $kT \ll E_2 - E_1$ の低動作温度を仮定すると、フェルミレベル E_F と井戸内電子ガスの 2 次元密度 n_w とを関係づける式は簡単になり、 $n_w = (m^*/\pi\hbar^2)(E_F - E_1)$ となる。ここに m^* は電子の有効質量である。不純物濃度の上限値 n_w^* は、 E_F がサブバンド E_2 のすぐ下にあるケースに対応する。このとき、 $n_w^* = (m^*/\pi\hbar^2)(E_2 - E_1) = (m^*/\pi\hbar^2) \Delta E_{21}$ である。私たちの検出器の場合、サブバンド間のギャップは $\Delta E_{21} = 11.1$ meV である。対応する値は $n_w^* = (m^*/\pi\hbar^2) \Delta E_{21} \approx 3.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ である。2 次元密度が n_w^* を超える不純物レベルでは、 E_2 が一部しか充填されず、目標ピーク周波数において暗電流が増えるとともに、光吸収特性が改善しないまま光検出器の分光感度が広がってしまう。私たちのサンプルに対して選択した n_w の実測値は、 n_w^* の約 3 分の 1 であった。これは $5.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ のバルク密度に対応する。

電極層に対して最適な不純物添加 n_c を実施すると、安定した低抵抗のオーム性電極が実現すると同時に、検出器の正面入射に対して十分な透過性が実現する。素子の想定動作温度は低い (10 K 未満) ため、 $n_c = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ という比較的高い不純物濃度を選択した。 $1 \sim 4$ THz のテラヘルツ

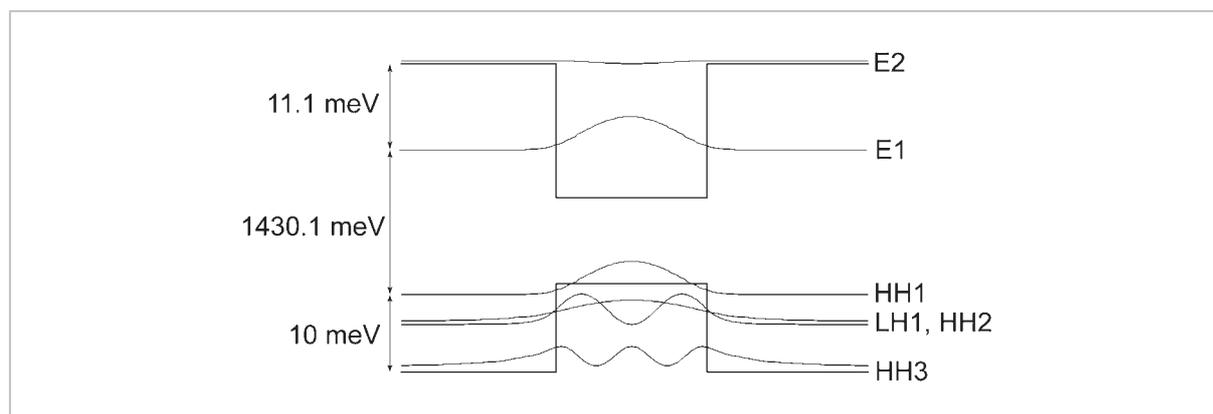


図 1 サブバンド間共鳴周波数が 3 THz (波長: 約 $100 \mu\text{m}$) の QW 構造のバンド図
この構造は、18 nm の GaAs QW とアルミニウム合金含有量が 2% の AlGaAs バリアで構成されている。

時間領域分光法 (THz TDS) による透過率測定を実施したところ、入射放射のわずか数パーセントしか電極層を透過していないことが判明した (図 3)。電極層の不純物濃度を $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ に低減すると、透過率は 60 % 超まで改善する。ただし、不純物濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ を下回るときの電極の低温特性については、まだ試験を実施していない。

検出器の設計においても一つ重要なポイントは、バリア厚さの選択である。これは暗電流の

様々なトンネル機構に直接影響する。様々なバリア幅及び井戸内の不純物濃度が予測暗電流に与える複合的な影響について、数値シミュレーションを実施し、トンネリングの予測電流密度が 10^{-6} A/cm^2 を下回るための最適値として、80 nm のバリア幅を選択した。

分子線エピタキシャル成長法 (MBE) によって、絶縁性 GaAs 基板上にサンプルを成長させた。X 線回折、走査型電子顕微鏡 / エネルギー分散型分光装置 (SEM/EDS) 及びフォトルミネッセンス (PL) による測定を行い、サンプルの組成、周期及びエネルギー構造を決定した。アルミニウム含有量は低かった (2 %) もの、MBE 成長と矛盾のない結果が得られ、意図したパラメータとの差異はわずかであった。

これらのサンプルを標準的な加工方法によって加工し、サイズが異なる単素子型の四角形メサを作製した。垂直入射のテラヘルツ放射がこの構造によって吸収されるサブバンド間吸収の選択則を満たすため、1 次元の金属製回折格子型結合器を上記メサの上面に形成した。この結合器は検出器の上部電極の機能も果たす。特定のカットオフ波長 λ_c に関する従来の設計慣行に従い、周期が $100 \mu\text{m}$ (λ_c)、 $50 \mu\text{m}$ ($\lambda_c/2$) 及び $25 \mu\text{m}$ ($\lambda_c/4$) の金属回折格子を備えたサンプルを作製した [11]。本稿で示したのは、 $50 \mu\text{m}$ 周期の金属回折格子を備えた $1 \times 1 \text{ mm}^2$ の光検出器による実験結果である。

検出器サンプルを機械式冷凍機に入れた。この冷凍機は $T = (3 - 300) \text{ K}$ の範囲において温度を安定化する機能を備えていた。検出器を冷却シールドで完全に覆い、それを温度 $T = 40 \text{ K}$ に維持した状態で、暗電流の測定を実施した。光電子測定においてサンプルは外部からの光子束にさらされた。この光子束は、冷却シールドに取り付けられた (かつ同じ温度に維持され) フィルタモジュール及び冷凍機の外部シールドに備わり、結果的に 60° の視野を持つ室温テフロン窓を通して入射した。フィルター式を備えたフィルタモジュールは可視光及び近赤外・中赤外光を遮断し、目的のテラヘルツ帯スペクトルレンジにおいて確実な帯域透過フィルタとして機能する。光検出器の分光感度をフーリエ分光器 (FTS) によって測定した。

暗電流と印加電界の関係が温度によって変わる

n^+ -GaAs (Si doped, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)	top contact layer	400 nm
$\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$		80 nm
GaAs (4-14 nm, Si doped, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)		18 nm
$\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$		80 nm
GaAs (4-14 nm, Si doped, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)		18 nm
		⋮
		⋮
GaAs (4-14 nm, Si doped, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)		18 nm
$\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$		80 nm
GaAs (4-14 nm, Si doped, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)		18 nm
$\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$		80 nm
n^+ -GaAs (Si doped, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)	bottom contact layer	800 nm
Semi-insulating GaAs substrate		

図2 MBE によって成長させた量子井戸型テラヘルツ帯検出器の構造概要

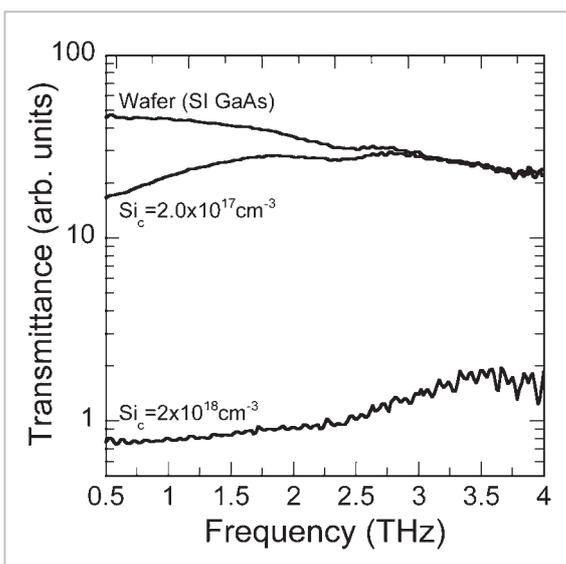


図3 QW 構造におけるテラヘルツ帯の透過率に Si の不純物濃度を与える影響を、時間領域分光法 (THz TDS) によって測定した結果。不純物濃度が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の電極層は、入射放射の数パーセントしか透過していない。不純物濃度を $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ に下げると、透過率は 30 % まで上昇する

様子を図4に示す。検出器は ± 60 mV 以内のバイアス電圧及び 3 K 以上の動作温度において安定した動作を示した。バイアスが負電圧と正電圧の間で変動しても、電流-電圧特性のヒステリシスは生じなかった。このことは、極低温においても良好な電極特性が維持されていることを示している。予想どおり、データ中には2種類の暗電流メカニズムしか存在しない。 $T=6$ K の温度までは、熱放出に関連する電流が温度に依存して指数関数的に増減する傾向が支配的である。低温側では、熱アシストトンネリングが暗電流の主要因となる。古典的な熱放出から量子力学的なトンネリングに次第に移り変わる様子を、図5にやや詳しく表示する。曲線は $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 付近で平坦化しており、温度依存性が低下している。このことは、共鳴による井戸間トンネリングや不純物介在型トンネリングといった別の電流メカニズムが、80 nm のバリアによって無視できるレベルまで抑制されていることを示している。暗電流の熱電子成分の標準モデル $J_D \sim T_{\text{exp}} (\Delta E_a/kT)$ (例えば[12]-[14]) を実験データに当てはめることによって、活性化エネルギー $\Delta E_a = E_2 - E_F = 10.5$ meV を得た。この結果 $E_F \sim 1$ meV が得られる。 $E_F = \pi \hbar^2 n_w / m^*$ $= 3.6$ meV によって井戸内不純物濃度から E_F を推定すると、不純物の有効濃度は $n_w = 1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ の設計値より小さいと考えられる。

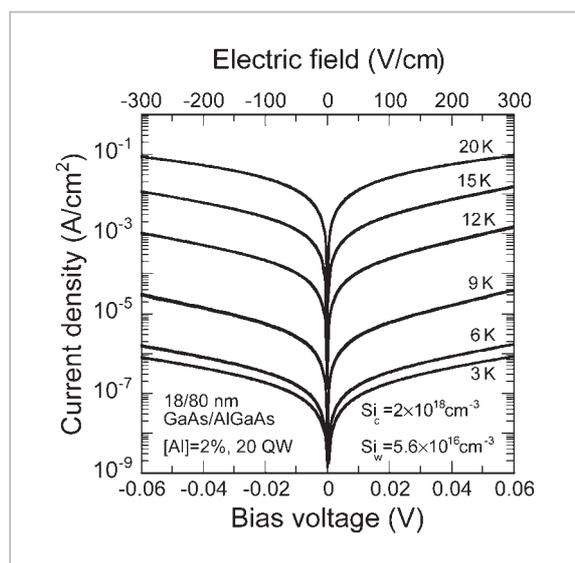


図4 暗電流と、バイアス電圧及び温度との関係
 ± 60 mV において素子は安定した動作を示し、その特性はほぼ対称であった。

校正済みの黒体輻射源を用いて、検出器のレスポンス係数を測定した。電流-電圧特性を幾つかの光子束条件下で比較することによって、40 mV のバイアス電界及び 3 K の動作温度において $13 \text{mA}/\text{W}$ のレスポンス係数を得た。レスポンス係数の値が低いのは、不純物濃度の高い上部電極層において入射放射の損失が大きいことと、素子に使用される1次元の単純な回折格子型結合器の結合効率があまり高くないためである。既に触れたように、電極層の不純物濃度を下げることによってその透過率を最大 60 % まで改善することができる。このことはレスポンス係数を直接向上させる。極低温において良好な電極特性を確実に得るためには、上記の電極について、更なる試験が必要である。

検出器の分光感度を図6に示す。測定値の S/N 比改善のため、バイアス源を組み込んだ、バッテリー給電式のフィードバックプリアンプを使用した。下部電極に 40 mV の正バイアスを印加する一方、上部電極はプリアンプのフィードバックによって仮想接地電位に維持した。ピーク周波数の測定値は設計値と十分な一致を示した。しかし、実験で得たスペクトルと予測スペクトルの間にはかい離があった。これは、モデルに使用した仮定が少なかったためだと考えられる。例えば、連続準位による固有状態を少ししか計算に含めなかったため、孤立準位から連続準位への遷移によって

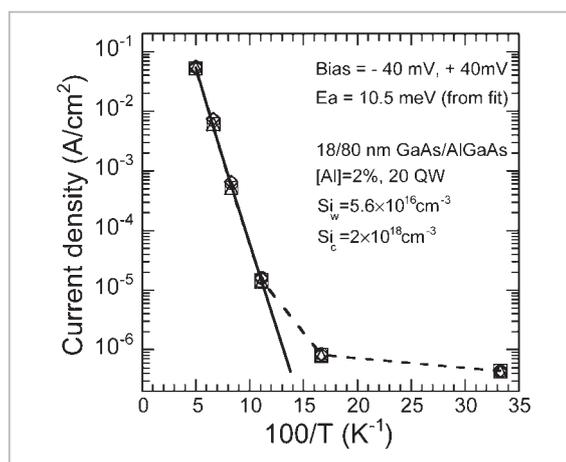


図5 ± 40 mV のバイアス電圧における暗電流と温度との関係
 実線は熱電子成分の標準モデルによる $J_D \sim T_{\text{exp}} (\Delta E_a/kT)$ による当てはめを示す ($\Delta E_a = 10.5$ meV が得られた)。電流は 6 K より低温において $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 付近で平坦化し、バリアの熱アシストトンネリングによって制限される。

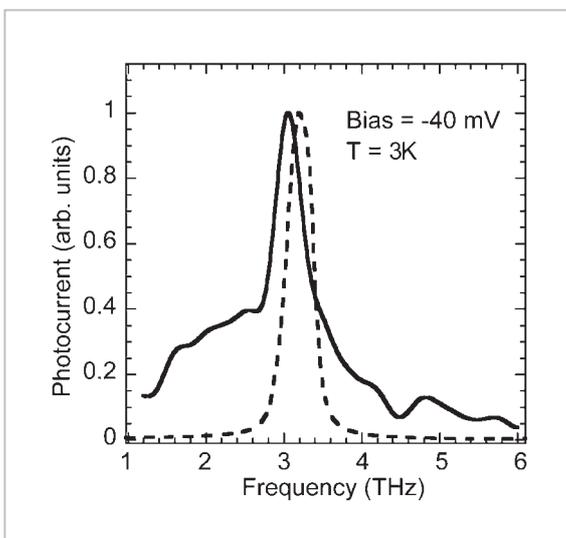


図6 検出器の応答感度を正規化したスペクトル(実線)と数値シミュレーションの結果

測定された応答感度は、設計上の検出周波数に近い。モデルでは量子井戸がどれも同じであること、バリアのアルミニウム含有量が一定(2%)であること及び電界が一樣であることを仮定していた。孤立準位から連続準位への遷移によってスペクトル幅が拡大する効果については、計算に盛り込まれていない。

生じるスペクトル幅の拡大を正確に見積もれなかった可能性がある。このほか、モデルでは量子井戸がどれも同じであること、バリアのアルミニウム含有量が一定(2%)であること及び電界が一樣であることを仮定していた。光検出器について得られる分光感度は各井戸の効果が総合的に表れるため、一部の量子井戸における成長パラメータや動作条件のばらつきが、スペクトル形に影響を与えている可能性がある。スペクトルが低周波側で強いという非対称性の原因についてはまだよく

分かっていない。考えられる理由のうち妥当なものとして、不純物による吸収と回折格子型結合器における一様でない分光特性がある。ドーピングしたQWの吸収度は井戸内の温度、不純物濃度及び不純物の分布に複雑に依存する。この効果は、QWサブバンドの近傍に共鳴不純物バンドが形成されること(例えば E_2 直下の $2p_z$)及び不純物の結合エネルギーがその3次元バルク値に比べて高い(最大で2~3倍)ことに関係する[15]~[17]。私たちの実験条件に近い低温域及び中程度の不純物濃度では、最下位の不純物バンドにおけるキャリアの凍結によってサブバンド間遷移に替わる光吸収メカニズムが存在する可能性がある[18][19]。

検出器について測定された分光感度が予測と異なるもう一つの要因として、回折格子型結合器の特性が考えられる。結合効率の周波数依存性によって不均一な結合が発生すれば、検出器の実際のスペクトル特性が隠されてしまう。今後の数値シミュレーションと実験においては、今回の実験結果を説明する背景のメカニズムを明らかにしたい。

結論として、本稿では、正面入射のGaAs/AlGaAs量子井戸型テラヘルツ帯検出器の動作を示した。これは目的のピーク周波数を3 THzとする量子井戸(QW)のサブバンド間吸収を利用する。設計上の検討及び実験の結果は、井戸内及び電極の不純物濃度の最適化並びに回折格子型結合器の設計改良によって、性能を大幅に改善する余地があることを示している。

参考文献

- 1 R. Köhler, A. Treducucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Richie, R. C. Iotti, and F. Rossi, "Terahertz semiconductor-heterostructure laser", *Nature* 417, 156, 2002.
- 2 B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno, "Operation of terahertz quantum-cascade lasers at 164 K in pulsed mode and at 117 K in continuous-wave mode", *Opt. Express* 13, 3331, 2005.
- 3 L. Ajili, G. Scalari, N. Hoyler, M. Giovannini, and J. Faist, "InGaAs-AlInAs/InP terahertz quantum cascade laser", *Appl. Phys. Lett.* 87, 141107, 2005.
- 4 H. Yasuda, I. Hosako, S. Miyashita, and M. Patrashin, "Terahertz electroluminescence from GaSb/AlAs quantum cascade laser", *Electron. Lett.* 41, 1062, 2005.
- 5 H. C. Liu, C. Y. Song, A. J. Spring-Thorpe, and J. C. Cao, "Terahertz quantum-well photodetector", *Appl. Phys. Lett.* 84, 4068, 2004.

- 6 H. Luo, H. C. Liu, C. Y. Song, and Z. R. Wasilewski, "Background-limited quantum-well photodetector", Appl. Phys. Lett. 86, 231103, 2005.
- 7 B. D. Jackson, G. de Lange, T. Zijlstra, M. Kroug, J. W. Kooi, J. A. Stern, and T. M. Klapwijk, "Low-noise 0.8-0.96 and 0.96-1.12 THz superconductor-insulator-superconductor mixers for the Herschel space observatory", IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, 54(2), 547-558, 2006.
- 8 J. J. A. Baselmans, M. Hajenius, J. R. Gao, A. Baryshev, J. Kooi, T. M. Klapwijk, B. Voronov, P. de Korte, and G. Gol'tsman, "NbN hot electron bolometer mixers: Sensitivity, LO power, direct detection and stability", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, 15(2), 484-489, 2006.
- 9 M. Fujiwara, T. Hirao, M. Kawada, H. Shibai, S. Matsuura, H. Kaneda, M. Patrashin, and T. Nakagawa, "Development of a gallium-doped germanium far-infrared photoconductor direct hybrid two-dimensional array", Appl. Opt. 42(12), 2166, 2003.
- 10 S. D. Gunapala, S. V. Bandara, J. K. Liu, C. J. Hill, S. B. Rafol, J. M. Mumolo, J. T. Trinh, M. Z. Tidrow, and P. D. LeVan, "1024X1024 pixel MWIR and LWIR QWIP focal plane arrays", Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 5783, 789, 2005.
- 11 W. J. Li and B. D. McCombe, "Coupling efficiency of metallic gratings for excitation of intersubband transitions in quantum-well structures", J. Appl. Phys. 71(2), 1038, 1992.
- 12 B. F. Levine, J. Appl. Phys. 74(8), R1, 1993.
- 13 M. A. Kinch and A. Yariv, "Performance limitations of GaAs/AlGaAs infrared superlattices", Appl. Phys. Lett. 55(20), 1093, 1989.
- 14 G. Sarusi, S. D. Gunapala, J. S. Park, and B. F. Levine, "Design and performance of very long-wavelength GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum-well infrared photodetectors", J. Appl. Phys. 76 (10), 6001, 1994.
- 15 G. Bastard, "Hydrogenic impurity states in a quantum well: A simple model", Phys. Rev. B 24(8), 4714, 1981.
- 16 C. Priester, G. Allan, and M. Lannoo, "Resonant impurity states in quantum-well structures", Phys. Rev. B 29(6), 3408, 1984.
- 17 M. Carras, V. Berger, X. Marcadet, and B. Vinter, "Experimental evidence of a Mott transition in highly doped two-dimensional confined structures", Phys. Rev. B 70, 233310, 2004.
- 18 D. Stehr, C. Metzner, M. Helm, T. Roch, and G. Srasser, "Resonant impurity bands in semiconductor superlattices", Phys. Rev. Lett. 95, 257401, 2005.
- 19 M. Helm, W. Hilber, and T. Fromherz, "Infrared superlattices: A probe of the miniband dispersion and the structure of the impurity band", Phys. Rev. B 48(3), 1601, 1993.



Mikhail Patrashin

新世代ネットワーク研究センター光波
量子・ミリ波 ICT グループ 博士(理
学)
量子井戸型テラヘルツ帯検出器



齋迫 巖

新世代ネットワーク研究センター光波
量子・ミリ波 ICT グループ研究マネー
ジャー 博士(理学)
テラヘルツ帯半導体素子とその計測応
用