

地上-衛星間光通信実験用レーザポインティングシステム  
：4象限 Si-avalanche photo-diode の特性測定

Laser beam pointing system for space optical communication experiment  
: Measurement of Si-APD quadrant detector characteristics

豊田雅宏 高見英樹 荒木賢一 有賀 規

Masahiro TOYODA Hideki TAKAMI Kenichi ARAKI Tadashi ARUGA

通信総合研究所

Communications Research Laboratory

**Abstract** An optical communication experiment between a geostationary satellite (ETS-VI) and a ground station is planned in 1993. To achieve high tracking accuracy for a weak light signal from the ETS-VI, a spatial tracking sensor using a Si-APD quadrant detector is under development. We measured crosstalk and noise characteristics of the Si-APD-QD Hamamatsu S4402. Tracking accuracy of  $1\mu\text{rad}(\text{rms})$  is achievable in the present tracking sensor system configuration.

### 1. はじめに

通信総合研究所では、宇宙光通信の基礎技術の確立を目的として、1993年に打上げられる技術試験衛星VI型(ETS-VI)を用いた光通信実験を計画している<sup>(1)</sup>。この実験では、地上一静止衛星間でレーザ光の送受信を行なうレーザリンクを構成する。大気中を伝搬することにより生じる伝搬方向の変動を補正するために、地上側においても衛星からのレーザ光を追尾して方向変動角を補正し送信レーザビームのポインティングを行なう<sup>(2)</sup>。ここでは、衛星からの微弱な光の高精度追尾に用いる4象限Si-アバランシェフォトダイオード(Si-APD-QD)について、素子間の干渉とノイズ特性を測定し、あわせて現在の光学システムで達成し得る追尾精度について検討した。

### 2. Si-APD-QDの特性測定

#### (1)測定に用いたSi-APD-QD

APD-QDは、微弱な光の位置検出や位置合せに用

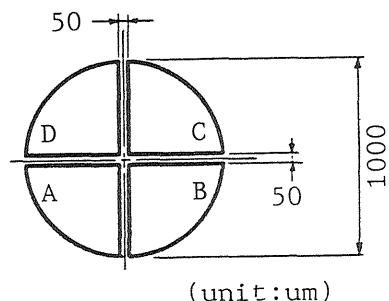


Fig1. Configuration of Si-APD-QD.

いられ、増倍率を変化させることにより微弱な信号を検出器の熱雑音レベル以上に高め最適なS/N比を設定することができる。これまでに、信号が強く光電流値で数nA程度以上のときのSi-APD-QDのノイズ特性の検討が行なわれている<sup>(3)</sup>。ここでは、浜松ホトニクスS4402を用いて種々の測定を常温で行なった。図1に素子の外形と回路図を示す<sup>(4)</sup>。受光面は直径1mmの円を4分割したものであり、素子間の不感領域の幅は $50\mu\text{m}$ となっている。また、各素子のアノードが共通になっており、逆バイアス電圧はアノード側に4素子共通に負の電圧を印加し、カソード側から信号を読み出すようになっている。

#### (2)素子間の干渉

各素子は完全に独立したものではなくクロストークが存在する。この状態はカソード側の端子間の抵抗値が指標となり、その値は逆バイアス電圧 $V_r$ によって変化していく。図2に逆バイアス電圧に対する端子間抵抗値と増倍率 $M$ の測定結果を示す。抵抗の測定は隣接した素子間で行なった。対角の素子間ではこの結果の約1.5倍であった。端子間抵抗は $V_r$ が80V以上で急激に増加している。この結果は、素子間の干渉は $V_r$ が80V以上、 $M$ が5以上で急激に小さくなることを示している。図3に $M$ を10に設定し、個々の素子より十分小さい径の光スポットを受光面上で隣接した2つの素子上

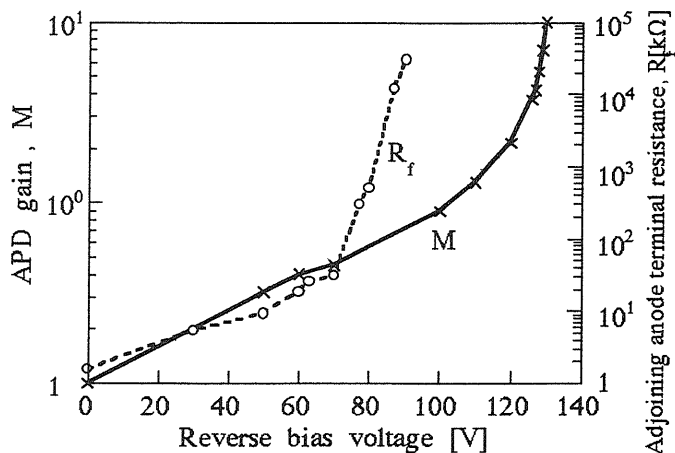


Fig. 2 APD gain and resistance between adjoining anode terminals as functions of reverse bias voltage.

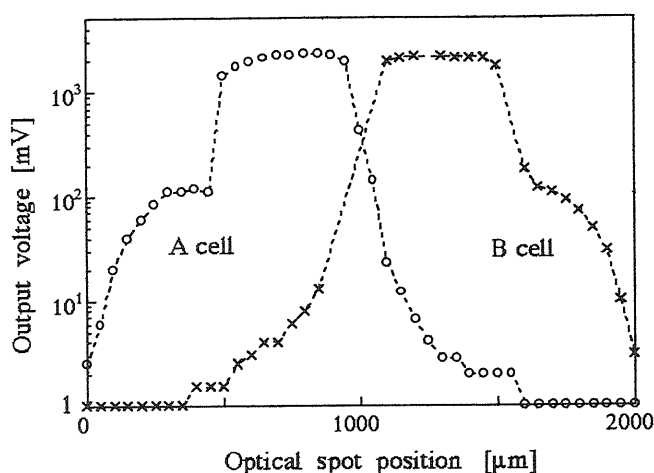


Fig. 3 Output voltage vs optical spot position.

を走査したときの2素子の出力電圧の変化を示す。残りの2素子の出力電圧の最大値は8mVであった。電流電圧変換回路の帰還抵抗値 $R_f$ は200M $\Omega$ とした。光スポットが完全でない影響が認められるが、これを含めても隣接素子間の干渉は出力電圧に関して1/100以下と得られた。また、この2素子のMの差は6.5%程度であった。

### (3)ノイズ特性

ノイズの測定は、赤色発光ダイオードの光をAPD-QDの受光面に一様に当て、NDフィルタを用いて光量を変化させ行なった。図4に増倍前の光電流 $I_L$ をパラメータとした増倍率M対ノイズ電圧スペクトル密度 $V_n$ のグラフを示す。 $I_L$ はMの値と200M $\Omega$ の帰還抵抗 $R_f$ で変換された電圧値から求めた。Mが4までの特性は、素子のカソード端子間の抵抗が低いことと、逆バイアス電圧が高いときと比

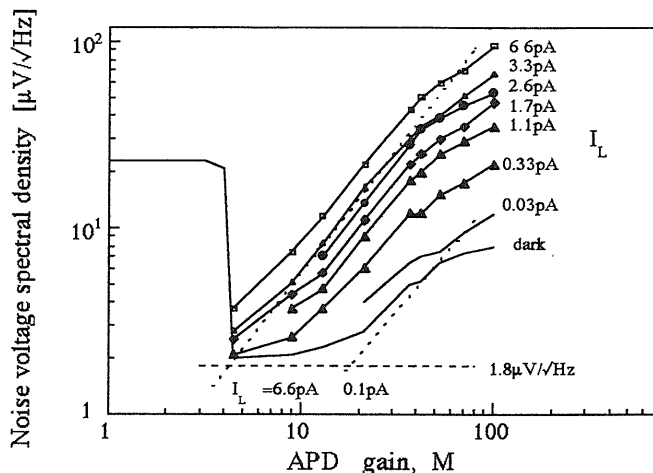


Fig. 4 Noise voltage spectral density as functions of APD gain.

べ拡散容量が大きいためアンプから見込んだ素子の容量が大きく、電圧性のアンプノイズが利いているためと考えられる<sup>(5)(6)</sup>。 $I_L$ が6.6pAのときのMが10から40までの直線部の傾きから過剰増倍雑音指数 $x$ は0.62と得られた。また、Mが40以上でグラフの傾きが減少しており、シングルのSi-APDの $x$ 値0.3~0.4とは異なる結果であった<sup>(7)</sup>。0.62の $x$ の値と遮光時の特性から、接合を通過し増倍される暗電流は0.1pA程度と計算できる。グラフ内に、 $R_f$ による $1.8 \mu V/\sqrt{\text{Hz}}$ の熱雑音電圧 $V_{nt}$ と、 $x$ を0.62とおき、 $I_L$ が6.6pAと0.1pAのときのショットノイズ $V_{ns}$ の理論値を書込んだ。 $V_{ns}$ は測定値が理論値より約 $\sqrt{2}$ 倍大きい。今回の測定ではノイズの波長依存性については考慮していないが、可視から近赤外の波長領域で波長の増加とともに $x$ が減少する結果が報告されている<sup>(8)</sup>。素子と帰還抵抗を液体窒素温度に冷却した場合の効果を考えて、熱雑音が半減し、暗電流によるショットノイズが熱雑音レベル以下になったとしても、トータルのノイズ値は光電流が0.3pA程度以上ではあまり減少しない。冷却した場合には常温と同じMでは降伏電圧が下がることから、なだれ領域幅が狭くなり $x$ が増加することが考えられる<sup>(8)</sup>。また、素子間の干渉についても、端子間抵抗の変化により変わる可能性がある。ノイズの計算式を次式に示す。

$$V_{n_s} = \sqrt{2 e I_L M^{2+x} R_f} \quad (1)$$

$$V_{nt} = \sqrt{4 k T R_f} \quad (2)$$

ここで、 $e$  は電気素量、 $K$ はボルツマン定数、 $T$ は絶対温度である。

### 3. 追尾精度

#### (1)電圧S/N比対光量特性

次式に電圧S/N比( $SNR_V$ )の計算式を示す。

$$SNR_V = I_L M R_f / (V_n \sqrt{\Delta f}) \quad (3)$$

ここで、 $V_n$ はトータルのノイズ電圧スペクトル密度、 $\Delta f$ は雑音帯域幅である。図5にノイズの測定結果をもとにして、 $I_L$ に対する電圧S/N比の変化を $M$ をパラメータとして示す。 $R_f$ は $200M\Omega$ 、 $\Delta f$ は $200Hz$ とした。この特性により、光量が決めば最適の増倍率が定まり、そのときの電圧S/N比が求まる。 $I_L$ が大きいときの、ショットノイズリミットの受光状態ではグラフは傾きが $1/2$ の直線となり、 $I_L$ が $0.1pA$ 以下の熱雑音が利いている状態と比べて光量減少時のS/N比の低下は小さく、光量の変動に対して高いS/N比が維持できる。また、 $I_L$ が $1pA$ 以上のときの各 $M$ の特性を比較すると、ショットノイズリミットまで引上げてしまえば、 $M$ が小さいほどS/N比が高いことがわかる。ショットノイズリミットではS/N比は $R_f$ に依存しないが、 $R_f$ が大きいほどショットノイズリミットにもちこみ易く、検出信号の周波数をカバーする範囲でより大きい $R_f$ を設定することが望ましい。参考までに $R_f$ の熱雑音だけを考慮したPhoto-diodeの場合の電圧S/N比を書入れた。

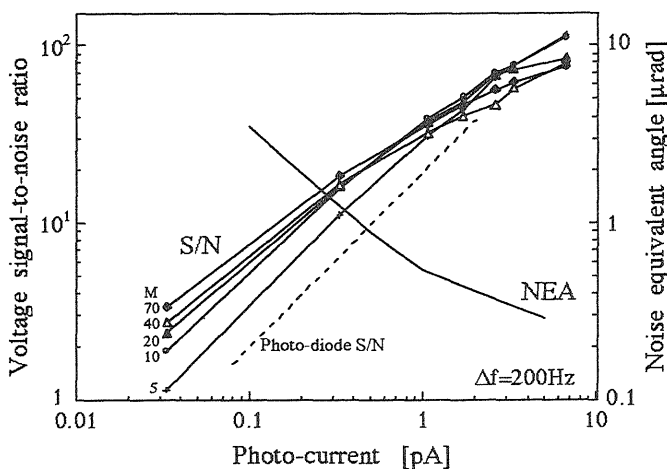


Fig.5 Voltage signal-to-noise ratio and noise equivalent angle as functions of photo-current.

#### (2)追尾センサーの雑音等価角度(Noise Equivalent Angle:NEA)

直径 $D$ の一様分布の光スポットがAPD-QD上にあるとき、個々の素子の電圧S/N比( $SNR_V$ )から、検出位置誤差 $P_n$ および対応する追尾誤差(雑音等価角度NEA)は次式で与えられる<sup>(9)</sup>。この関係は光スポットが受光面の中央に常に当たっている状態を仮定している。

$$P_n = \pi D / (16 SNR_V) \quad (4)$$

$$NEA = P_n / f = \pi D / (16 f SNR_V) \quad (5)$$

$f$ は受光光学系の瞳位置から受光面までの距離であり、結像光学系では集光レンズの焦点距離となる。ここでは、4素子の $SNR_V$ は等しいとし、増倍率のアンバランス、不感領域、割算器等の演算装置自体で発生するノイズの影響は考慮していない。図5中に増倍率が20のときのNEAをプロットした。ここで、 $D$ は $0.5mm$ 、 $f$ は $5000mm$ とした<sup>(10)</sup>。 $D$ は不感領域幅の10倍で受光面直径の $1/2$ であり、 $f$ は視野と追尾センサーの大きさの制限から妥当な値と考えている。光電流が $0.4pA$ 以上のとき、NEAは $1\mu rad$ 以下となる。この値はrms値であり、 $3\sigma$ の確率範囲では $3\mu rad$ となる。地上から送信するレーザービームの拡がり角は $30\mu rad$ 程度である。一方、衛星からの推定フラックスによる光電流は各素子当り $3.3pA$ である。この約 $1/8$ である $0.4pA$ の光電流でも追尾精度として $3\mu rad$ というビーム拡がり角の $1/10$ 程度が達成可能であることがわかった。

#### 4. おわりに

衛星の追尾に用いるSi-APD-QDの特性の測定を行なった。素子間の干渉について調べ、増倍率とノイズ特性を測定し検討した。そして、光量に対する電圧S/N比と追尾センサーのNEAを明らかにした。現在のところ推定フラックスの $1/8$ に弱まった場合においてrms値で $1\mu rad$ の追尾精度が期待できる。今後の課題としては、APD-QDについては、微弱光の位置検出時の冷却の効果と最適な $R_f$ 値についてより詳細な検討を行ないたい。また、ETS-VIとの光通信実験に用いるレーザーポインティングシステムについては、大気による伝搬方向変動の検出から追尾信号によるポインティングミラーの制御までの整備を進め、そのためのパラメータと

なるシンチレーションおよび伝搬方向変動の値を  
実際に天体を観測して測定を行なう予定である。

《参考文献》

- (1)荒木他, 1991年電子情報通信学会春季全国大会, B-204, 1991.
- (2)豊田他, 第14回レーザーセンシングシンポジウム, P-17, 1991.
- (3)E. Swanson and J. Roberge, Optical Engineering, Vol. 28, No. 6, p. 659, June 1989.
- (4)浜松ホトニクス S4402 Technical data.
- (5)D. Hall, et al. , Applied Optics, Vol. 14, No. 2, p. 450, February 1975.
- (6)古川, 松村, 電子デバイス[1], 昭晃堂, p. 77, 1982.
- (7)高宮他, 電子通信学会技術研究報告, OQE74-30, 1974.
- (8)神戸他, 電子通信学会技術研究報告 OQE76-12, 1976.
- (9)M. Katzman, et al. , Laser satellite communications, Prentice-Hall, p. 45, 1987.
- (10)豊田他, 平成4年レーザー学会学術講演会第12回年次大会, 12aV6, 1992.