

# アバランシフォトダイオードの数値解析

神戸 宏<sup>1</sup>, 横山 清行<sup>2</sup>

(受領日: 2010年4月28日)

<sup>1</sup> 高知工科大学

〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

<sup>2</sup>(有)ノアコンサルティング

〒709-0854 岡山県岡山市東区瀬戸町江尻1607

E-mail: [kanbe.hiroshi@kochi-tech.ac.jp](mailto:kanbe.hiroshi@kochi-tech.ac.jp)

**要約:** アバランシフォトダイオード (APD) について数値計算により解析した。Si-APD、Ge-APD、および Ge/Si ヘテロ接合 -APD を対象とし、暗電流、光電流および素子内部のポテンシャル分布、電界分布、キャリア密度分布などについてバイアス電圧依存性を明らかにした。なだれ降伏電圧に近くなるとなだれ増倍効果により暗電流と光電流は増加する。Ge-APD においては Ge の真性キャリア密度が高いため、暗電流は Si-APD に比べて数桁大きくなり、実験結果と一致する傾向であることを明らかにした。ヘテロ接合の効果を取り入れた Ge/Si-APD では、バイアス電圧の増加に伴い空乏層が Ge 層に達すると光電流のみならず、暗電流が増加する。これは実験結果の傾向と一致しており、Ge-APD の場合と同じ理由による。今回の数値解析手法は任意の不純物密度分布に対して計算ができるため、素子設計に有用である。

## 1. はじめに

光ファイバを用いた光通信は、情報通信技術 (ICT: Information Communication Technology) を支える中心的技術の1つである。幹線系では様々な多重化技術により伝送容量は Tbit/s から、Pbit/s になろうとしている。加入者系 (アクセス系) ではブロードバンド回線の一環として光ファイバによる通信 (FTTH: Fiber To The Home) が普及しつつある。光ファイバ通信において受光素子の特性はシステムの性能を決める重要な要素の1つである。受光素子としてフォトダイオード (PD)、あるいはアバランシフォトダイオード (APD) が用いられているが、内部電流増幅機構を持つ APD では、PD に比べて受光感度は向上する<sup>1)</sup>。現在実際に用いられている APD は InGaAs/InP ヘテロ接合を用いた、SAM (Separated Absorption and Multiplication regions) -APD であり、吸収領域 (InGaAs) となだれ増倍領域 (InP) を分離した構造である<sup>2,3)</sup>。InGaAs/InP-APD において、なだれ増倍領域を InP から Si に換えることにより、増倍雑音を低減でき<sup>4)</sup>、最低受信電力は 3dB 程度改善

できると推定されている<sup>5,6)</sup>。そのため、InGaAs/Si ヘテロ接合<sup>7,8)</sup> や Ge/Si ヘテロ接合<sup>9-11)</sup> を用いた APD が提案されている。われわれは Ge/Si-APD の実現を目指してウェハボンディングによる Ge/Si ヘテロ接合の実現とそれを用いたフォトダイオードの作製を進めている<sup>12-16)</sup>。

ヘテロ接合 APD の特性を知るためには、pn 接合やヘテロ接合の解析が必要である。基本的な APD の特性は近似を用いた解析的手法で得られる解から理解することができる<sup>17,18)</sup>が、APD の動作は非線形な方程式で記述されるため、解析的手法では実際の素子特性を詳細に理解することは難しい。このため、素子の動作を解析し理解すると共に、動作特性を明らかにし、最終的には素子の設計に結びつけるため、数値解析が必要になる。InGaAs/InP- フォトダイオードについてはヘテロ接合の特性を考慮した数値解析がなされている<sup>19)</sup>が、衝突イオン化によるなだれ増倍効果は考慮されていなかった。Ge/Si-APD の設計と動作特性解明を目指し、これまでにヘテロ接合に適用した数値解析手法をなだれ増倍効果による APD 動作ま

表 1: 計算に用いたパラメータの値<sup>21-23)</sup>

項目	単位	Si		Ge	
エネルギーバンドギャップ $E_g$	eV	1.12		0.661	
電子親和力 $\chi$	eV	4.05		4.0	
比誘電率 $\epsilon_r$		11.9		16.2	
伝導帯状態密度 $N_c$	cm <sup>-3</sup>	$2.80 \times 10^{19}$		$1.0 \times 10^{19}$	
価電子帯状態密度 $N_v$	cm <sup>-3</sup>	$2.6 \times 10^{19}$		$5.0 \times 10^{18}$	
真性キャリア密度 $n_i$	cm <sup>-3</sup>	$9.65 \times 10^9$		$2.0 \times 10^{13}$	
	キャリア	電子	ホール	電子	ホール
移動度 $\mu$	cm <sup>2</sup> /Vs	1450	500	3900	1900
拡散係数 $D$	cm <sup>2</sup> /s	37	13	101	49
キャリア寿命 $\tau$	$\mu$ s	14	14	14	14
拡散長 $L$	$\mu$ m	230	140	380	260
逆方向飽和電流 $J_s$	A/cm <sup>2</sup>	$2.4 \times 10^{-15}$	$1.4 \times 10^{-15}$	$1.7 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-8}$
衝突イオン化率	A cm <sup>-1</sup>	$3.80 \times 10^6$	$2.25 \times 10^7$	$1.55 \times 10^7$	$1.00 \times 10^7$
$A_{\text{exp}}(-B/E)$	$E$ : 電界 $B$ V/cm	$1.75 \times 10^6$	$3.26 \times 10^6$	$1.56 \times 10^6$	$1.28 \times 10^6$

で拡張して数値解析を試みた<sup>20)</sup>。

本論文ではまず単純な構造のホモ接合 Si-APD および Ge-APD の数値計算により解析した結果を述べ、APD の動作を明らかにする。なだれ降伏電圧まで逆方向バイアス電圧を印加し、電流-電圧特性、およびキャリア密度分布などについて述べる。さらに Ge/Si ヘテロ接合 APD について得られた結果を述べる。数値解析により、大きな近似をせずに APD の特性を明らかにすることができる。

## 2. 数値解析について

簡単のために、時間依存のない定常状態、および 1 次元モデルを考える。用いた基本方程式は、ポアソン方程式と電流連続の式である。

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{1}{\epsilon} \frac{d\Psi}{dx} \frac{d\epsilon}{dx} = -\frac{q}{\epsilon}(p-n-N) \quad (1)$$

$$\frac{dJ_n}{dx} = q(R-G), \quad \frac{dJ_p}{dx} = -q(R-G) \quad (2)$$

ここで、 $\Psi$  は静電ポテンシャルであり、 $\epsilon$  は誘電率、 $q$  は単位電荷、 $p$  はホール密度、 $n$  は電子密度、 $N$  はイオン化した不純物密度である。 $R$  および  $G$  はそれぞれキャリアの再結合による消滅、および発生の割合である。電流密度  $J_{n,p}$  は擬フェルミ準位  $\phi_{n,p}$  を用いて次式で表される。

$$J_n = -q\mu_n n \frac{d\phi_n}{dx}, \quad J_p = -q\mu_p p \frac{d\phi_p}{dx} \quad (3)$$

ヘテロ接合を考慮するため、バンドパラメータ  $\theta_{n,p}$  を導入し、キャリア密度を静電ポテンシャル、擬フェルミ準位、およびバンドパラメータにより

次式で表現する<sup>19)</sup>。

$$\begin{aligned} n &= n_i \exp\left[\frac{q(\Psi - \phi_n + \theta_n)}{kT}\right] \\ p &= n_i \exp\left[\frac{q(\phi_p - \Psi + \theta_p)}{kT}\right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \theta_n &= \frac{\chi_2 - \chi_1}{q} + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{c2}}{N_{c1}}\right), \\ \theta_p &= -\frac{\chi_2 - \chi_1}{q} - \frac{E_{g2} - E_{g1}}{q} \\ &\quad + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{v2}}{N_{v1}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $n_i$  は真性キャリア密度、 $\chi_i$  は電子親和力、 $E_{gi}$  は禁制帯幅、 $N_{ci}$  および  $N_{vi}$  はそれぞれ伝導帯および価電子帯の状態密度である。下付の 1 および 2 は、異なる半導体を表す。1 および 2 の区別をなくせば、ホモ接合の解析ができる。キャリアの再結合、および発生は次式で表される。

$$R = \frac{pn - n_i^2}{\tau_n(p + n_i) + \tau_p(n + n_i)} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} G &= G_{\text{photo}} + G_{\text{avalanche}} \\ &= KF_p \exp[-K(x - x_{\text{int}})] \\ &\quad + \frac{1}{q}(\alpha|J_n| + \beta|J_p|) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\tau_{n,p}$  は少数キャリア寿命時間、 $F_p$  は入射する単位面積当たりのフォトン数、 $K$  は光の吸収係数、 $x_{\text{int}}$  は光吸収の始まる位置である。また、 $\alpha$ 、 $\beta$  は電子、ホールの衝突イオン化率であり、なだれ増倍効果を表す。以上の式を用い、式(1)、式(2)を自己無撞着に解くことにより、解が求まる。計算に用いたパラメータを表 1 に示す<sup>21-23)</sup>。

### 3. Si- および Ge-APD の計算結果

まず、Si-APD および Ge-APD の計算結果について述べる。

計算した Si、および Ge ダイオードのいずれのモデルも同じ不純物密度と同じ層厚とした。すなわち、接合は  $n^+$ -p 型片側階段接合とし、層構造は  $n^+$ -p- $p^+$  である。 $n^+$  層のドナー密度  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ  $1.3 \mu\text{m}$ 、p 層のアクセプタ密度  $1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ  $2.4 \mu\text{m}$ 、および  $p^+$  層のアクセプタ密度  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ  $1.3 \mu\text{m}$  として計算した。

電流-電圧特性の計算結果を図 1 に示す。ここでは光を入射しない時の暗電流と、光を入射した時の光電流を示している。光の吸収係数はいずれも  $7800 \text{ cm}^{-1}$  とし、 $n^+$  層側表面から入射している。

Si-APD では、暗電流値は 10 V 以下で計算誤差のためやや揺らいでいるが、これを越えるとスムーズな特性を示し、40 V 程度までの逆方向電流は、 $(1 \sim 10) \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$  である。これは素子の大きさを直径  $500 \mu\text{m}$  (面積  $1.96 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ) とすると、 $10^{-12} \text{ A}$  程度となる。この計算結果から降伏電圧を厳密に決めることはできないが、42 V 付近で暗電流、光電流共に立ち上がっている。これはなだれ増倍効果によるものである。半導体の禁制帯幅  $E_g$  eV や、接合の低濃度側の不純物密度  $N_B \text{ cm}^{-3}$  を用いて、片側階段接合に対してよく知られているつぎの実験式<sup>21)</sup> で計算した降伏電圧 43.3 V とほぼ一致している。

$$V_B = 60 \left( \frac{E_g}{1.1} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-\frac{3}{4}} \quad (8)$$

一方、Ge-APD では、0 V 付近から、暗電流は  $4 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  となっている。素子の大きさを直径  $500 \mu\text{m}$  とすると、 $10^{-9} \text{ A}$  程度となる。実際の

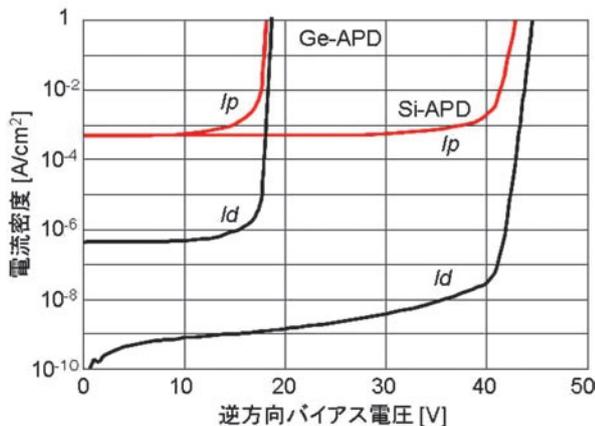


図 1 Ge-APD および Si-APD の電流-電圧特性。  
 $I_d$  および  $I_p$  はそれぞれ暗電流と光電流である。

素子の値<sup>24)</sup>はこれに比べて約 2~3 桁大きい。降伏電圧は 19V 程度であり、やはり上の実験式から求めた 19.6V とかなり良く一致している。このことは、計算に用いた Si、Ge の衝突イオン化率の値<sup>22,23)</sup>の正しさを表している。

図 1 の結果は、Ge では Si に比べて 2.5 桁以上大きな暗電流が流れることを示している。これについて考えてみる。

理想的な pn 接合に流れる電流は空乏層外から空乏層に注入される、いわゆる拡散電流であり、つぎの式で表される<sup>21)</sup>。

$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

$$J_s = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \quad (10)$$

$$n_i^2 = p_{n0} n_n = p_p n_{p0} \quad (11)$$

ここで、 $J_s$  は逆方向飽和電流であり、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は温度、 $V$  はバイアス電圧であり順方向では正、逆方向では負の電圧とする。 $D_{n,p}$ 、 $L_{n,p}$  はそれぞれ電子とホールの拡散係数と拡散距離である。拡散距離  $L$  はキャリア寿命を  $\tau$  とすると  $L = \sqrt{D\tau}$  と表される。 $n_i$  は真性キャリア密度であり、 $p_{n0}$ 、 $n_n$  は n 層中の (中性領域の) ホール密度 (少数キャリア) と電子密度 (多数キャリア) であり、 $p_p$ 、 $n_{p0}$  は p 層中のホール密度 (多数キャリア) と (中性領域の) 電子密度 (少数キャリア) である。空乏層の外側、拡散長程度までに存在する少数キャリアが空乏層に入り込んで流れるというモデルから、 $J_s$  が式 (10) で求められる。

$n^+$  層、および  $p^+$  層の不純物密度を  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  とし、式 (10) により計算した  $J_s$  の値を表 1 に示す。Ge に対する値は数値解析結果と 1 桁程度の差であるが、図 1 に示す Si の暗電流の値は拡散電流に比べて 6 桁程度大きな値になっている。

一定の逆方向バイアス電圧の時のキャリア密度分布を図 2 に示す。ここで注目すべきことはどちらも空乏層中にキャリアが存在しており、完全空乏近似は成り立たないことを示している。Si では、空乏層中のキャリア密度は電子、ホールともに  $10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$  であるのに対して、Ge ではこれよりも約 1 桁程度大きい。Si では空乏層外の少数キャリア密度が小さいため、暗電流を決めているのは空乏層中のキャリアのドリフト電流であると考えられる。このことにより、拡散電流近似式 (10) から求める暗電流より 5~6 桁大きな暗電流となる。なお完全空乏近似では空乏層外の拡散電

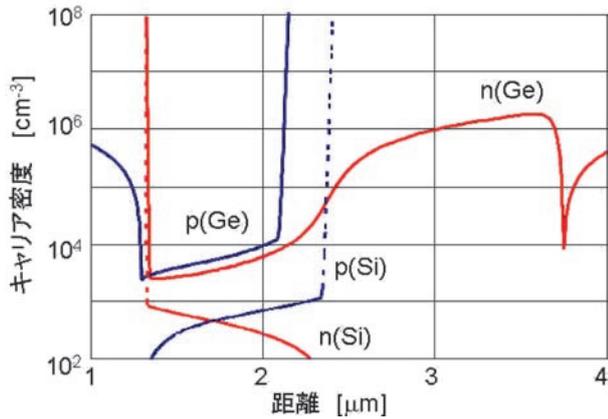


図2 Ge-APD(バイアス電圧 10V)、および Si-APD(同 20V)におけるキャリア分布。nは電子、pはホールを表している。

流の他に空乏層中での発生-再結合電流が考えられている<sup>21)</sup>。

GeとSiとで最も大きな違いは空乏層の外の少数キャリア密度の大きさである。この違いは7桁近くの真性キャリア密度の違いによるものである。Geでも空乏層中にキャリアが存在しドリフト電流もあるが、空乏層外の少数キャリア密度は高く、この値を用いて計算した拡散電流近似から求めた値と数値計算結果がほぼ一致している。Geでは空乏層の外のp層中電子密度は $10^6 \text{ cm}^{-3}$ 程度と大きく、これは拡散電流として流れる。またp<sup>+</sup>層の電子も電流に関係している。同様にn<sup>+</sup>層の少数キャリアであるホールも高い密度であることがわかる。

図1に示すように、Si-APDでもGe-APDでも、一定の光入射に対する光電流は低電圧ではほぼ一定値であり、なだれ降伏電圧に近づくと衝突イオン化による増倍作用により増加する。Si-APDについて、いくつかの逆方向バイアス電圧における光入射のない時の電子、ホール分布調べてみると、逆方向に電圧を高くするにしたがって空乏層が伸びてゆき、なだれ降伏電圧に近くなるとホールも電子も増加を始める。なだれ増倍が起るとn<sup>+</sup>層にも多量のホールが流れ込む。光入射のある時もほぼ同様であるが、光によりキャリアが励起されているため、ホールの密度はn<sup>+</sup>層中でもかなり高く、また空乏層中でも高い。この時もなだれ降伏電圧に近くなるとホールも電子もなだれ増倍効果により増加を始める。

#### 4. Ge/Si ヘテロ接合アバランシフォトダイオードの解析結果

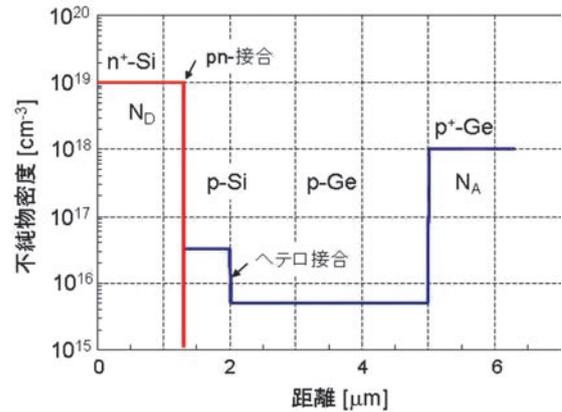


図3 計算に用いた Si/Ge ヘテロ接合フォトダイオードの不純物プロファイル。pn 接合は Si 中にあり、p-Si と p-Ge とでヘテロ接合が形成されている。

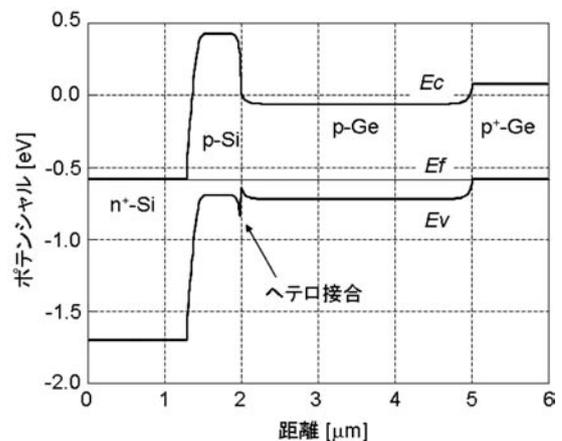


図4 熱平衡状態でのバンド構造。ヘテロ接合のバンド不連続量は伝導帯と価電子帯で同じであると仮定している。

素子の構造は、n<sup>+</sup>-p 接合を持つ Si と、p-p<sup>+</sup> の Ge とがヘテロ接合を形成する構造とした。図3は計算に用いた Si/Ge ダイオードの不純物密度分布である。すなわち、接合は n<sup>+</sup>-p 型片側階段接合とし、n<sup>+</sup>-Si 層のドナー密度  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ  $1.3 \mu\text{m}$ 、p-Si 層のアクセプタ密度  $3.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ  $0.7 \mu\text{m}$  である。p-Ge 層、および p<sup>+</sup>-Ge 層のアクセプタ密度、厚さはそれぞれ、 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.3 \mu\text{m}$  として計算した。計算に用いたこれらの値は、実際の実験に用いた素子の構造(ただし実際の素子<sup>16)</sup>では p<sup>+</sup>-Ge 層はなく、オーム性電極になっている)に基づいている。

熱平衡状態でのバンド構造を図4に示す。ヘテロ接合でのバンド不連続量は伝導帯と価電子帯で等しい、すなわち  $\Delta E_c = \Delta E_v = \frac{1}{2} \Delta E_g = \frac{1}{2} (E_{gSi} - E_{gGe}) = 0.23 \text{ eV}$  であると仮定した。フェルミ準

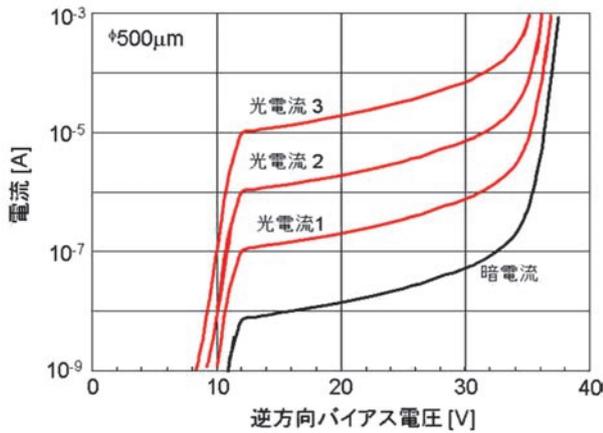


図5 逆方向電流（暗電流）と光電流の電圧依存性。なだれ降伏電圧は36V付近にある。

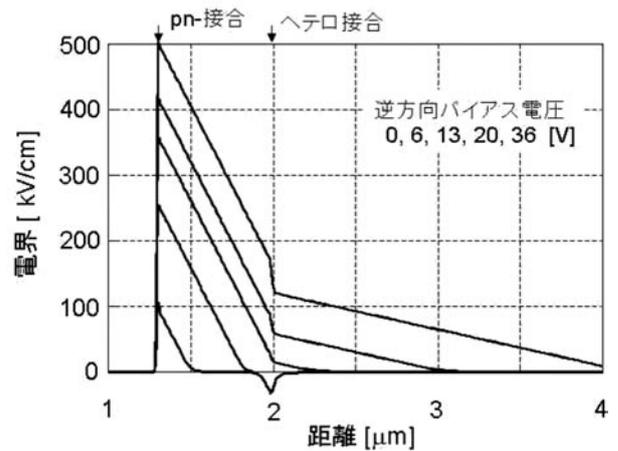


図7 各電圧における電界分布。

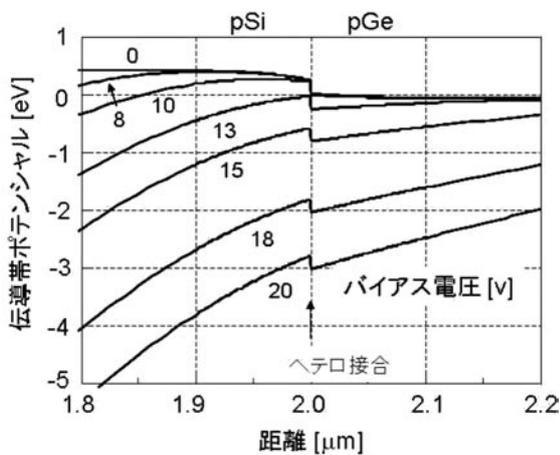


図6 各電圧における伝導帯のポテンシャル。

位は図において  $-0.6 \text{ eV}$  の付近にある。p-Ge 層と  $p^+$ -Ge 層との境界に大きなポテンシャル差ができ、ここにホールが蓄積している。 $p^+$ -Ge 層の不純物密度を下げるとこのポテンシャル差は低くなる。しかし、そうすると少数キャリア密度は増加し、前述したように暗電流の増加をもたらす。

逆方向バイアス電圧に対する電流特性の計算結果を図5に示す。素子の大きさを直径  $500 \mu\text{m}$  (面積  $1.96 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ) とした。pn 接合は Si 中にあり、印加電圧に応じてここから空乏層が伸びる。暗電流は、8 V 付近から増加し始め、12 V を越えた付近で  $10 \text{ nA}$  (約  $5 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ) 程度の逆方向電流となる。電流が立ち上がる付近で空乏層がヘテロ界面に達し、10 V を越えた付近でヘテロ界面を乗り越えて Ge 中に入り込むことは、後述するポテンシャル分布やキャリア密度分布の計算結果から確認できる。降伏電圧は36V付近にある。前述したように Ge-APD の場合と同様に、空乏層が Ge に達したとき暗電流が増加するのは Ge の大き

な少数キャリア密度のためである。

次に光を入射したときの計算結果について述べる。光は  $n^+$ -Si 側から入射し、Si を透過して Ge 層で吸収されるものとした。光の波長  $1300 \text{ nm}$  を想定し、Ge の吸収係数を  $7800 \text{ cm}^{-1}$  とした。図5に示すように、10倍ずつ異なる3つの光入力電力レベルについての光電流の計算結果である。暗電流と同様空乏層が Ge に達した付近から光電流が流れ始め、それ以上の電圧ではなだれ増倍により緩やかに増加していることが分かる。

この状態をより明確にするため、伝導帯ポテンシャルの逆方向バイアス電圧依存性を図6に示す。ヘテロ界面近傍を拡大して示している。ヘテロ界面に作られている伝導帯のエネルギー不連続量  $\Delta E_c$  は一定のまま、印加電圧が高くなるにしたがってバンドは強く傾き、電子が右 (p 層側) から左 (n 層側) へ流れることを示している。このとき、空乏層電界で加速された電子は伝導帯のエネルギー不連続量 ( $0.23 \text{ eV}$ ) を十分に乗り越えるであろうことはこの図から直感的に理解できる。

逆方向バイアス電圧に対する電界分布を図7に示す。空乏層が Ge に達する前は通常の片側階段型 pn 接合と同様、接合で最大の電界となり、そこから直線的に減少する。このときヘテロ界面に逆方向の電界が存在するが、空乏層が Ge に入り込むとヘテロ界面の電界は階段状に変化し、p-Ge の不純物密度に応じて空乏層が伸びて行く様子が分かる。なだれ降伏電圧付近では距離  $4 \mu\text{m}$  まで空乏層が伸びている。

光入射のない時の各電圧における正孔密度分布を図8に示す。熱平衡状態ではヘテロ界面において p-Si 側で正孔の空乏が、p-Ge 側で正孔の蓄積が見られる。バイアス電圧を高くするにつれて空

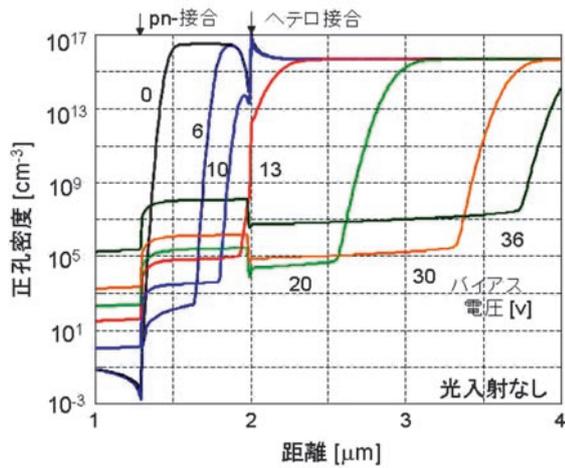


図8 光入射なしでの、各電圧における正孔分布。

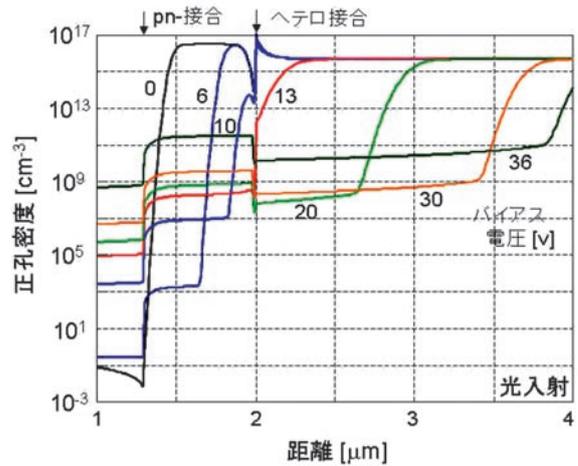


図10 光入射時の、各電圧における正孔分布。

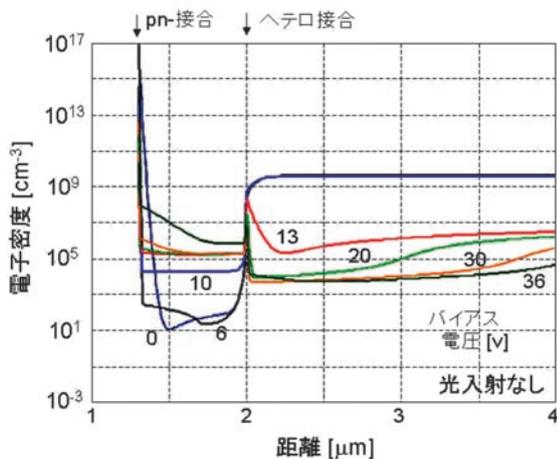


図9 光入射なしでの、各電圧における電子分布。

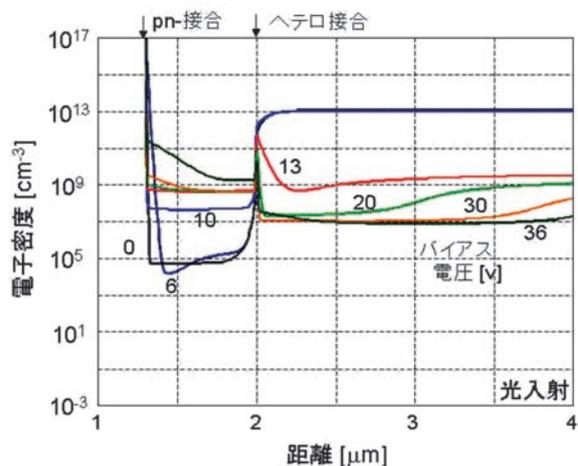


図11 光入射時の、各電圧における電子分布。

乏層は伸び、10V 付近でヘテロ界面に達すると正孔は空乏する。さらにバイアス電圧を高くすると空乏層は Ge 中を伸びてゆくが、30V 付近からなだれ増倍作用により p-Si および p-Ge 層中の正孔密度は増加し始めることがわかる。

一方電子密度分布を図9に示す。空乏層がヘテロ界面に達しない間、p-Ge 中の電子密度は  $10^9 \text{ cm}^{-3}$  オーダの値を保っているが、空乏層が Ge 層に入り込むと Ge 層の電子は p-Si に注入され、一定値まで減少する。なだれ降伏電圧に近づくにつれて p-Si 中の電子密度は増加し始める。

光入射(図5の光電流2のレベル)時の各電圧における正孔密度分布を図10に、電子密度分布を図11に示す。光入射のないときの計算結果と比べると、光で生成された正孔・電子を反映して密度が増加するが、正孔、電子共にほぼ同じような振舞いを示している。すなわち空乏層が Ge に入り込むと空乏層中に電子が流れ込み、ドリフト電流として流れるため p-Ge 層中の電子は急激に

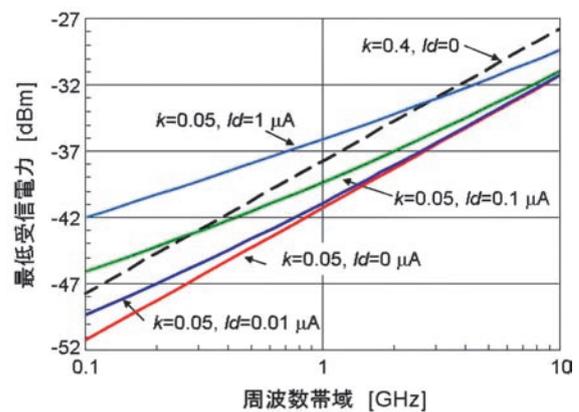


図12 最低受信電力の暗電流依存性。

減少する。バイアス電圧がなだれ降伏に近づくとき Si 層中で増倍が起こり、正孔も電子も増加する。これらの様子も光入射のない時と同様である。

前述したように、Ge を用いると暗電流の増加は避けられない。暗電流が信号対雑音比や最低受信電力など、受信機としての性能にどのように

影響するかを検討した。周波数帯域 0.1GHz から 10GHz までの最低受信電力の計算結果を図 12 に示す。この計算はビット誤り率  $10^{-9}$  に相当する信号対雑音比 21.59dB を得るのに必要な最低受信電力を求めたもので、衝突イオン化率比  $k=0.4$  はなだれ増倍層を InP とする場合に相当し、 $k=0.05$  は Si とする場合に相当する。暗電流  $I_d=0\mu\text{A}$  の場合を比べてみるとなだれ増倍層を InP から Si に変えると最低受信電力は約 3dB 程度改善されることが分かる。増倍される暗電流が  $1\mu\text{A}$  になると、InP から Si に変えた利点は相殺されてしまうが、 $0.1\mu\text{A}$  であるなら、高い周波数では利点が生きる。さらに  $0.01\mu\text{A}$  とするなら、全周波数帯域で有利になる。図 5 に示したように、直径  $500\mu\text{m}$  の素子の計算による暗電流は  $0.01\mu\text{A}$  程度であるので、これに近づけるような素子を実現することにより、なだれ増倍層を InP から Si に変える利点が生かされる。素子の受光面積をさらに小さくすることも現実的な方法である。

## 5. まとめ

以上 Ge-APD、Si-APD および Ge/Si ヘテロ接合-APD についての数値解析の結果を述べた。数式に基づいて解析的に解を求めるには多くの仮定を置いたり、近似をする必要があるのに対して、数値解析の利点はいくつかの仮定を置くだけで基本式から直接的に解を求められること、そしてその結果から測定や観測が不可能な素子内部の現象を定量的に示すことができることである。素子の外部から観測できる特性は、電流-電圧特性や静電容量-電圧特性などであるが、数値解析により素子内部のバンド構造、電界分布、キャリア密度分布などの詳細を明らかにすることができる。

ここで述べた数値解析により、Ge-APD の暗電流は少数キャリア密度に依存していること、Si-APD の暗電流は空乏層内のキャリア密度（完全に空乏しているわけではない）に依存していること、なだれ増倍効果によりキャリアがどのように増倍されるかなどを明らかにした。また Si 中に pn 接合を有する Ge/Si ヘテロ接合-APD についての解析により、暗電流、光電流、キャリア密度分布、電界分布のバイアス電圧による変化を明らかにした。Ge の少数キャリア密度が高いことを反映し、p-Si 中の空乏層がヘテロ界面に達し Ge に入り込むと暗電流が大きくなること、また暗電流の低減には電極層 ( $p^+\text{-Ge}$ ) の不純物密度を高くすることが望ましいことも示した。空乏層が Ge 層に達す

ると光電流も増加するが、この時のキャリア密度の空間分布、電界分布、およびポテンシャル分布のバイアス電圧による変化の状態を明らかにした。

数値解析では、基本的に任意の構造のダイオードについて計算できる。例えば動作電圧の低減のため、ヘテロ界面近傍の Si の不純物密度を高めることにより、Ge に入り込む電界の大きさを低くする、といったいわゆる lo-hi 型不純物密度分布の設計も可能である。また、Ge/Si ヘテロ界面は酸素や炭素が蓄積したアモルファス状になっていることが分かっているが<sup>14)</sup>、そのような層を挿入した構造の計算も可能である。これらについては今後の課題としたい。

## 謝辞

本研究を進めるに当たり日頃お世話になる電子・光システム工学教室前教室長 成沢忠教授、教室長 岩下克教授をはじめとする教室の皆様へ感謝いたします。また、Ge/Si ヘテロ接合フォトダイオードの研究を進めるに当たり有益な討論をいただいた、物質環境システム工学教室 谷脇雅文教授、そして研究室の伊藤達也、多田昌乗、宮地伸英、片岡明廣、金森建治、豊田起八の皆様にお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) J.C.Campbell, "Recent advances in telecommunications avalanche photodiodes," IEEE J. Lightw. Technol., vol.25, no.1, pp.109-121, Jan. 2007.
- 2) N. Susa, H. Nakagome, H. Ando and H. Kanbe, "Characteristics of InGaAs/InP avalanche photodiodes with separated absorption and multiplication regions," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-17, no.2, pp.243-250, Feb. 1981.
- 3) H.Ando, Y.Yamauchi, H.Nakagome, N.Susa and H.Kanbe, "InGaAs/InP separated absorption and multiplication regions avalanche photodiode using liquid- and vapor-phase epitaxies," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-17, no.2, pp.250-254, Feb. 1981.
- 4) R.J.McIntyre, "Multiplication noise in uniform avalanche diodes," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-13, no.1, pp.164-168, 1966.

- 5) 神戸、「Si を基板とした光通信用アバランシフォトダイオード」、レーザー学会第 294 回研究会報告、RTM-02-57、2001 年 12 月.
- 6) 神戸、「Si を増倍層とするアバランシフォトダイオード」、高知工科大学紀要、vol.1, no.1, pp.69-73, 2004.
- 7) A.R. Hawkins, T.E. Reynolds, D.E. England, D.I. Babic, M.J. Mondry, K. Streubel, and J.E. Bowers, "Silicon heterointerface photodetector," *Appl. Phys. Lett.*, vol.68, no.26, pp.3692-3694, Jun. 1996.
- 8) Y. Kang, P. Mages, A.R. Clawson, P.K.L. Yu, M.Bitter, Z. Pan, A. Pauchard, S. Hummenl, and Y.H. Lo, "Fused InGaAs-Si avalanche photodiodes with low-noise performances," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.14, no.11, pp.1593-1595, 2002.
- 9) M. Carroll, K. Childs, D. Serkaland, R. Jarecki, T. Bauer, and K. Saiz, "Germanium-silicon separate absorption and multiplication avalanche photodetectors fabricated with low temperature high density plasma chemical vapor deposited germanium," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol.989, 0989-A12-05, 2007.
- 10) Y.Kang, M.Zadka, S.Litski, G.Sarid, M.Morse, M.J.Paniccia, Y.-H.Kuo, J.Bowers, A.Beling, H.-D.Liu, D.C.McIntosh, J.Campbell, and A.Pauchard, "Epitaxially-grown Ge/Si avalanche photodiodes for 1.3 $\mu$ m light detection," *Optics Express*, vol.16, no.13, pp.9365-9371, June 2008.
- 11) Y. Kang, H.-D. Liu, M. Morse, M.J. Paniccia, M. Zadka, S. Litski, G. Sarid, A. Pauchard, Y.-H. Kuo, H.-W. Chen, W.S. Zaoui, J.E. Bowers, A. Beling, D.C. McIntosh, X. Zhen, and J. Campbell, "Monolithic germanium/silicon avalanche photodiodes with 340 GHz gain-bandwidth product," *Nature Photonics*, vol.3, pp.59-63, Jan. 2009.
- 12) H.Kanbe, M.Komatsu, and M.Miyaji, "Ge/Si heterojunction photodiodes fabricated by wafer bonding," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.45, no.25, pp.L644-L646, 2006.
- 13) H.Kanbe, "Ge/Si heterojunction photodiodes by wafer bonding (invited)," presented at 19th Annu. Meet. IEEE Lasers & Electro-Optics Society, ThQ3, Montreal, Nov. 2006.
- 14) H.Kanbe, M.Miyaji, M.Hirose, N.Nitta, and M.Taniwaki, "Analysis of a wafer bonded Ge/Si heterojunction by transmission electron microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol.91, pp.142119 (1-3), Oct. 2007.
- 15) 神戸、宮地、廣瀬、「ウェハボンディングによる Ge/Si ヘテロ接合形成とフォトダイオード特性」、高知工科大学紀要、vol.5, no.1, pp.153-160, 2008.
- 16) H.Kanbe, M.Miyaji, and T.Ito, "Ge/Si heterojunction photodiodes fabricated by low temperature wafer bonding," *Appl. Phys. Express*, vol.1, no.7, pp.072301 (1-3), July 4, 2008.
- 17) G.E.Stillman and C.M.Wolf, "Avalanche photodiodes," in 'Semiconductors and Semimetals vol.13,' ed. by R.K.Willardson and A.C.Beer, Academic Press, New York, 1977.
- 18) 米津、「7 アバランシェ・フォトダイオード」、『光通信素子工学－発光・受光素子－』、pp.387-430、工学図書(株)、東京、1984.
- 19) K. Yokoyama, M. Tomizawa, H. Kanbe, and T. Sudo, "A numerical analysis of a heterostructure InP/InGaAs photodiode," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.30, no.10, pp.1283-1288, 1983.
- 20) 宮地、伊藤、神戸、横山、「Ge/Si ヘテロ接合アバランシフォトダイオードの数値解析」、平成 21 年度電気関係学会四国支部連合大会、11-12、2009 年 9 月.
- 21) S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices," 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981.
- 22) C.A.Lee, R.A.Logan, R.L.Batdorf, J.J.Kleinack and W.Wiegmann, "Ionization rates of holes and electrons in silicon," *Phys. Rev.*, vol.134, no.3A, pp.A761-A773, May 1964.
- 23) S.L.Miller, "Avalanche breakdown in germanium," *Phys. Rev.*, vol.99, no.4, pp.1234-1241, Aug. 1955.
- 24) O.Mikami, H.Ando, H.Kanbe, T.Mikawa, T.Kaneda, and Y.Toyama, "Improved germanium avalanche photodiodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol.16, no.9, pp.1002-1007, 1980.

# Numerical Simulation of Avalanche Photodiodes

**Hiroshi Kanbe<sup>1</sup> and Kiyoyuki Yokoyama<sup>2</sup>**

(Received : April 28th, 2010)

<sup>1</sup>Kochi University of Technology  
Tosayamada-cho, Kami-shi, Kochi 782-8502, JAPAN

<sup>2</sup>Noah Consulting Limited  
1607 Ejiri, Seto, Higashi, Okayama, Okayama 709-0854, JAPAN

E-mail : <sup>1</sup>kanbe.hiroshi@kochi-tech.ac.jp

**Abstract:** Properties of avalanche photodiodes (APD) are revealed by simulation of numerical analysis including impact ionization effects of carriers. APD structures are Ge-APD, Si-APD and Ge/Si heterojunction APD. Avalanche breakdown and current multiplication in dark current and photocurrent take place at a reverse bias voltage close to breakdown voltage. Carrier profiles and electric field profiles are displayed as a function of reverse bias voltage. Dark current of Ge-APD depends on background impurity density, that is larger than that of Si-APD. In Ge/Si-APD, dark current and photocurrent increase near the voltage at which the depletion layer reaches the heterojunction. The numerical simulation is useful for design Ge/Si heterojunction photodiodes.