Electron Voltaic Effect を応用 したパターン発生管

松下電器東京研究所 宮 崎 栄 一

半導体ダイオードと電子ビームを組合わせた高利得で解像度もよい新しいパターン発生管を考案した。電子衝撃により数 1000 倍の電流利得が Electron Voltaic Effect のために得られる面状の半導体ダイオードをターゲットにした装置で、このダイオードがパターンを描いた増幅のできるターゲットとして封入されている陰極線管である。加速電圧 10 kV の場合、電流利得は 2500 倍となり、2.5 mA の二次電流が、1 μ A のビーム電流に対して得られた。

撮像管のターゲットを電子ビームによって走査し、ターゲット上にある感度むらのためビームが制御される場合、シェーディングが発生し、画質を低下させる原因となるが、意識的にターゲットの感度を場所により変えた場合には、ターゲット上の像が得られ、この管は同一の絵を半永久的に再生可能なパターン発生管となる。感度差としてターゲット上の二次電子放出比の違いを用いた例がモノスコープである。二次電子放出の代わりに、これと類似の現象があれば、モノスコープ同様のパターン発生管ができるはずである。

P-N 接合、あるいは金属と半導体の接触などからなる半導体ダイオードを高速度電子ビームで衝撃すると、光をあてた場合の光起電力効果と類似の現象、すなわち Electron Voltaic Effect により数 1000 倍の電流増幅が行なわれる。とくに逆バイアスされた半導体ダイオードでは、非常に大きな電流利得が得られるうえ、高速度の応答を示す。

筆者は現在 Electron Voltaic Effect に関する基礎実験を行なっているが、その過程において、この現象を応用した新しい形のパターン発生管を考案した。これに Electron Voltaic Effect を応用した陰極線管の意味で

EVOSCOPE なる名称を与え、種々実験を行なった結果、一応の映像を出すことに成功し、すでに一部発表¹⁾したが、ここにその概要をまとめて報告する。

1. Electron Voltaic Effect の原理

1951 年、Ehrenberg 等²⁾は半導体ダイオードの一種であるセレンセルを 1.5×10^{-8} A の電子で衝撃した結果、加速電圧 5 kV からこの効果が現われだし、50 kV で電流利得が最大(約 500 倍)となり、50 kV 以上では次第に低下する現象を観測した。その後 Takeya, Nakamura³⁾はセレンセル、ゲルマニウムまたはシリコンの P-N 接合部に逆バイアス電圧を与えて、 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ A の電流で衝撃し加速電圧を 3 kV $\sim$ 18 kV 変えた結果、数百倍から数千倍の電流利得を得たと発表している。

1.1 筆者等の実験

以上の実験は連続的に衝撃する方法を用いているが、これでは試料が劣化しやすく、そのため再現性も悪い。そこで筆者等は試料の劣化を防ぎ、電流増倍機構の解明および高速度、高出力の増幅器としての可能性を見出すため、パルス的に電子衝撃を行ない、つぎの結果を得た^{4)~7)}。

(1) 電流利得は加速電圧に比例して増加する。またバイアス電圧とともに増加し、数 V で飽和する。

(2) 二次電流の立上り時間、立下り時間はバイアス電圧に逆比例して減少し、負荷抵抗にも関係するが、数 V で 1 μ s 以下にすることは容易である。しかし加速電圧には依存しない。

(3) 電流利得は表面層の厚さに逆比例して減少するが、感度が最大になる最適の膜厚がある。

つまり電流の増倍は加速電圧でおこり、発生した電子

筆者紹介

みやざき えい いち 昭和 29 年、北海道大学理学部物理学科卒業後、NHK に勤務。技術研究所、技術局にてカラー、白黒テレビの画像技術に従事。この間イメージオルシジョンの焼付防止の実験、カラーフィルムのマスキング実験などを行なう。昭和 35 年、東京大学理学部物理学科に転じ、桑原研究室にてアルカリハライドの光伝導について研究。その後、松下電器東京研究所に入社。以来、半導体ダイオードの電子衝撃による増幅作用に関する研究を行なっている。

"Fixed-Pattern Generator Using Electron Voltaic Effect" by Eiichi Miyazaki

第1図 半導体
ダイオード
中の電子ビ
ームの透過

-正孔の収集はバイアス電圧により、また時間特性は空乏層容量のバイアス電圧依存性によることが推定された。これらの実験事実より、高速度の変換の行なえる高出力の新しい装置が電子ビームと半導体ダイオードを組合わせることにより可能であることを指摘し、三の装置を提案した⁸⁾。最近、この現象を高速度高出力のスイッチに応用しようという試みが報告されている^{9)~11)}。

1.2 電流利得

第1図に示すように半導体ダイオードに電子ビームを衝撃すると、低加速電圧では表面層で止まってしまう何の効果も現われない。中加速電圧では空乏層内に達し、ここで多量の電荷担体（電子または正孔）を発生する。さらに高加速電圧になると空乏層をこえて半導体の内部奥深く入ることになる。

半導体ダイオードを電子で衝撃した場合の多量の電荷担体の発生に関しては、半導体自体に電子衝撃を行なったときと、ほぼ同じ機構であると想像される。

ここで電流利得 (G) をつぎのように定義する¹²⁾。

$$I_s = G I_B \quad (1)$$

I_s : 発生した二次電流, I_B : 衝撃するビーム電流

これは電子衝撃によって半導体中に G 個の電子-正孔対が発生したことを意味する。電子の加速エネルギー eV_A 、1 個の電子-正孔対の生成に要するエネルギー W とすると、電流利得はつぎようになる。

$$G = \frac{eV_A}{W} \quad (2)$$

e : 電荷, V_A : 加速電圧

W は半導体のエネルギー幅 E_G と関係づけられ

$$W = f \cdot E_G \quad (3)$$

と定義する。ここで $f \geq 1$ である。 f の値は半導体に固有であって、McKay¹³⁾ によると、シリコンで $f=3.2$ 、ゲルマニウムで $f=4.1$ と報告されている。シリコンを例にとると、 $E_G=1.1\text{ eV}$ であるから、 $W \approx 3.5\text{ eV}$ となり、電子の加速電圧が 10 kV の場合、約 2800 倍の利得が生ずることになる。

1.3 時間特性

一方、発生した電荷担体の集収に関して考えると、半導体ダイオードではその障壁（空乏層）に強い電場が作

用するため、単体の半導体の場合にくらべて非常に短い時間に能率よく集収されるものと考えられる。半導体ダイオードの時間特性を決定するものとして、つぎの3つの要素があげられる。

- 1) 電荷担体の走行時間
- 2) 電荷担体の拡散時間
- 3) 素子の CR 時定数

電荷担体が空乏層内で発生する場合には走行時間が主役となり、P-N 接合部における電荷担体の速度と、その動く距離に関係する。速度は電界の強さに関連した担体の易動度であり、その動く距離は空乏層の厚さである。走行時間 t_t はつぎの式で表われる¹⁴⁾。

$$t_t = \frac{2d^2}{\mu V_B}$$

d : 空乏層の厚さ (cm), μ : 遅い方の電荷担体の易動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$), V_B : 逆バイアス電圧 (V)

比抵抗 $100\Omega\cdot\text{cm}$ のシリコンを例にとると、バイアス電圧 10 V のとき空乏層の厚さは 15μ 程度、電界の強さは 10^4 V/cm で、電荷担体の移動する時間は 10^{-9} 秒となる。

つぎに電荷担体が空乏層外で発生する場合には拡散時間が問題となる。加速電圧が高くなって電子が空乏層をこえて半導体中に入り込むと、加速電圧に関連した深さに応じて、最大発生した電荷担体の寿命時間、少なくとも発生場所からの拡散による時間が効くようになるものと推定される。拡散時間 t_d はつぎの式で表わされる。

$$t_d = \frac{L^2}{D} \quad (5)$$

L : 電子の飛程 (cm), D : 拡散定数 (cm^2/s)

加速電圧 10 kV の電子のシリコン中での飛程は 1μ 程度と考えられるから、バイアス電圧 10 V の空乏層の厚さを 15μ 程度とすると、この場合は拡散時間を問題にしないでよくなる。

最後に素子の CR 時定数であるが、半導体ダイオードをパターン発生管のターゲットに使用する場合、広面積

I_s =二次電流, D =整流性素子, C_0 =電極間容量, C_d =空乏層容量 (V_B に依存), C_s =浮遊容量, R_{sh} =ダイオードの並列抵抗(逆抵抗), R_s =ダイオードの直列抵抗, R_L =負荷抵抗, V_B =バイアス電圧

第2図 半導体ダイオードの等価回路

にならざるをえない。したがって半導体ダイオードと付属する負荷抵抗の時定数が効いてくる（第2図）。

半導体ダイオードをふくむ回路を定電流源とすると

$$R_{sh} \gg R_L \gg R_s, C_d \gg C_0 \gg C_s$$

であるから、簡単に $C_d R_L$ の時定数を考えればよい。空乏層の容量 C_d はバイアス電圧 V_B に依存し、つぎのように表わされる。

$$C_d = \frac{\epsilon A}{4\pi d} = \frac{A}{2} \sqrt{\frac{\epsilon e N_d}{2\pi (V_0 + V_B)}} \quad (6)$$

ϵ : 半導体の誘電率, A : ダイオードの実効面積,

d : 空乏層の厚さ, e : 電荷, N_d : ドナー密度, V_0 : 零バイアス時の障壁電位

いま直径 20mm のダイオードにバイアス 10V かけたときの C_d を計算すると約 2000PF となる。 R_L 100 Ω ならば時定数は 10^{-7} 秒程度である。

以上の考察から、面状のダイオードを使う場合は素子の時定数が時間特性を決定すると考えられる。

2. 構造

2.1 実験管

第3図に本パターン発生管 EVOSCOPE の構造を示す。この管は小形ブラウン管に似た形状および構造を有し、電子銃は普通ブラウン管に用いられているユニポテンシャルの静電集束形で、けい光面の代わりに面状に形成した金属と半導体の接触障壁からなる半導体ダイオードを増幅のできるターゲットとして封じたものである。このターゲットは原理的に2層からなるが、その走査面側の金層膜に再生すべきパターン、たとえば文字、写真、テストチャートなどを場所により金層膜の厚さを違え蒸着したものである。実験管は半導体ダイオードの交換に便利のように組立て装置にして排気しながら使用した。

2.2 ターゲット

第4図はターゲットであるパターンの描かれた半導体ダイオードの構造を示したものである。ニッケル鍍金した面状の銅電極上に直径 20mm, 厚さ 1mm のN形シリコン単結晶を、抵抗性接触になるように半田付けし、N形シリコンの表面を鏡面研磨後、金を膜厚 0.02μ 前後にパターンの字および階調に応じ厚さを変えて蒸着してある。これは金属と半導体の接触からなる表面障壁形のダイオードで、金膜とN形シリコンの接触面において金膜があたかもP形半導体であるような向きに整流性接触をなしている。

3. EVOSCOPE の動作

第3図にしたがって動作を説明する。電子銃からの電子ビームは高圧電源によって加速され、ターゲット面上

第3図
EVOSCOPE
の構造

第4図 ターゲットの構造

を偏向コイルによって走査する。ところがターゲットの走査面側の金の膜厚をパターンの字や階調に応じて違えてあるので、電子ビームは面上の位置により透過率の違いを生じる。この金膜を通過し空乏層に達した電子は、そこで多量の電子-正孔対が発生する。したがって、バイアス電源をもってこの半導体ダイオードに逆バイアス電圧を与えることにより、ターゲット内で Electron Voltaic Effect により生じた電流が能率よく収集され、電流増倍作用が行なわれる。電流利得は表面の金の膜厚に依存して増減するから、パターン上の透過率の違いに逆比例して入射した電子ビームの数十〜数千倍の二次電流（逆飽和電流）が得られる。この二次電流により出力抵抗の両端に発生した電圧が映像信号として取出され、再生像として見るこることができるわけである。

4. EVOSCOPE の特性

4.1 出力

バイアス電圧、加速電圧、金の膜厚、ビーム電流、負荷抵抗が出力を決定する。

(1) バイアス電圧

第5図に示されるように、出力はある値で飽和するからバイアス電圧はこの値から破壊電圧までの間をえらばよいわけである。しかし後で述べのように衝撃層の容量はバイアス電圧の $1/2$ 乗に逆比例して減少するが、暗電流はバイアス電圧に比例して増加するので、容量を小さくするためには破壊電圧直前の値にするべきである。また暗電流の増加がノイズとなるから、信号対ノイズ比が最良であって、なるべく大きなバイアス電圧にしなければならない。

第5図 バイアス電圧対電流利得

(2) 加速電圧

第6図は利得が(2)式で推定されるように、加速電圧に比例して増加することを示している。しかし3kV以下では金の膜厚のためか利得が急激に低下する。利得を大きく望むには加速電圧が高いほどよいが、装置の簡便さ、ターゲットの劣化などを考えると、できる限り低い電圧で使うことが望ましい。

(3) 金の膜厚

第7図は、金の膜厚と利得の関係を測定したものである。加速電圧、ビーム電流、バイアス電圧が一定の場合、金の膜面を通して電子ビームが半導体障壁を衝撃す

第6図 加速電圧対電流利得

るから、ビーム電流は金の膜厚に応じて減衰し、したがって二次電流は金の膜厚に逆比例して減衰する。ゆえに金の膜厚は薄いほどよいように思われるが、利得が最大になる最適の厚さがあることがわかる。

(4) ビーム電流

第8図にはビーム電流に対する利得および二次電流の関係を示している。加速電圧一定の場合、ビーム電流が増加すると電流利得は低下する。つまり二次電流はビーム電流の増加に比例せず、だんだん飽和してくる特性をもっている。しかし出力電圧は二次電流と負荷抵抗の積で決定されるから、ビーム電流をなるべく多くし、二次電流も多く取るようにすればよい。しかしビーム電流を増加すると電子ビームが太くなり、解像度が低下するので、この方から制限を受ける。

(5) 負荷抵抗

出力電圧は負荷抵抗 R_L と二次電流 I_s の積で決定されるから、第2図に関連してのべたように $R_{sh} \gg R_L \gg R_s$ の範囲でなるべく大きい方がよい。ダイオードの並列抵抗 R_{sh} は普通数百k Ω であり、ダイオードの直列抵抗 R_s が数十 Ω であるとする、 R_L は数十k Ω ~数百 Ω が適当である。以上は直流的に見た場合だが、交流的には空乏層容量が問題となり、周波数特性を映像帯域まで広げるには数百 Ω 以下でないといふべき。

【実験例】

バイアス電圧	10 V
加速電圧	10 kV
金の膜厚	0.02 μ ~0.5 μ
ビーム電流	1 μ A
負荷抵抗	100 Ω
出力電圧	0.25 V

4.2 解像度

第7図 金の膜厚対電流利得

解像度は大きく分けて、走査ビームとターゲット面との幾何学的関係と、ターゲット自体の周波数特性とに関係する。

(1) 幾何学的条件

走査ビームの集束の尖鋭度、ターゲット上のパターンの精細度、ターゲット面積と電子ビームの太さに関係する開口ひずみは、従来の撮像管、モノスコープと同じ条件で決定されるから、ターゲット面積は広いほど、ビームは細くて電流密度が大きくなほどよいのは当然である。

(2) 周波数特性

半導体ダイオードは第2図に示す等価回路の時定数をもっており、これがターゲットの周波数特性を決定する。空乏層容量はバイアス電圧に依存して減少するから、直径20mmのダイオードについて容量を測定すると第9図のようになる。したがってこの特性をもったダイオードからの二次電流を負荷抵抗に流し、電圧として取出した場合の周波数特性は第10図の傾向を示す。

これから、周波数特性をよくするには負荷抵抗と容量を小さくすればよいことは明らかであるが、負荷抵抗は出力電圧に影響を与えるからそれほど低くはできない。また容量は(6)式からわかるようにドナー密度の小さい半導体を使い、バイアス電圧は破壊電圧直前のなるべく大きな値をえらび、面積を小さくすればよいが、面積はビームの太さに対する解像度の方から制限を受け、これもそれほど小さくすることはできない。

しかし以上の測定結果は、この種の面状の半導体ダイオードが、テレビジョン信号発生用として一応使えるし、回路上で周波数特性を補償すれば十分実用になることを意味する。

第8図 ビーム電流対電流利得・二次電流

第9図 空乏層容量のバイアス電圧依存性

第10図 周波数特性のバイアス電圧依存性

[実験例]

ダイオードの直径	20mm
シリコンの比抵抗	500Ω・cm
空乏層容量(バイアス10V)	800pF
負荷抵抗	100Ω
時定数	8×10^{-8} 秒
周波数特性	2Mc (−3dB)

4.3 階調

(1) 白黒の決定

第7図で利得最高になる膜厚に金を蒸着し、これを白とする。黒は使用する加速電圧で、電子が透過しない膜厚を計算または実験で求める。

(2) 中間調の出し方¹⁵⁾

厚さ d をもった物質に I_0 なる電子流を、ある速度で衝撃した場合、透過した電子流 I との間にはつぎの関係がある。

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha d} \quad (7)$$

α は物質と加速電圧に関係する定数で、金に対して10kVで加速した場合は

$$\frac{I}{I_0} = e^{-15.4d} \quad (8)$$

を得る。これで各中間調厚さを求めると、

写真 1 再生像の一例

	透過率 I/I_0	金膜の厚さ $d(\mu)$
白	100%	0.02
	70%	0.05
	35%	0.09
	17%	0.14
	5%	0.22
黒	0%	1 以上

となる。この計算にしたがって、金の膜厚がそれぞれの厚さになるよう蒸着を行なった。実用上は、表面層の膜厚を順次に変えるのは工程が複雑となるから、網目印刷法により表面層をそこなわないで印刷するか、網目法で蒸着するか、またはマスクを使用する方法がよいと思われる。再生像の一例を写真 1 に示す。

4. 4 SN 比

半導体ダイオードのノイズは理論的にいろいろ考えられるが、実際にはバイアス電圧に関係する暗電流が問題になる。出力や空乏層容量の点からはバイアス電圧は高い方がよいが、一方、暗電流が増加し、電圧がさらに高くなると発熱や破壊を生じる。しかし発熱のおこらない範囲では、暗電流の絶対値はそれほど問題でなく、暗電流の変動分が問題になる。つぎに直径 20mm の金蒸着シリコンダイオードにバイアス 10V 与えた場合の各電流実測値を示す。

二次電流 2.5mA, 暗電流 130 μ A,
暗電流変動分 1 μ A

これから SN 比はほぼ 60dB あることになる。

4. 5 シェーディング

二次電子の再分布などはないのでシェーディングは考えられない。強いていえばダイオードの感度むらが考えられるが、製作上注意すれば、ほとんど問題にならない。

4. 6 寿命

(1) 電子衝撃によらない劣化

半導体ダイオードは真空中に封入してあるから、水蒸気、酸素、その他のガスによる劣化は考えられない。し

かし真空中にあるため、空気中で使用する場合より低いバイアス電圧での発熱が考えられるが、必要最小限度のバイアス電圧で使用すれば問題はないと思われる。

(2) 電子衝撃による劣化

電子衝撃した場合、加速電圧とビーム電流との電力による発熱と、高速度電子の運動エネルギーによる半導体内での格子欠陥との 2 点から劣化を変える必要がある。これの詳細な実験は目下計画中である。

一例ではあるが、同一点を 10kV, 1 μ A, 直径 0.5mm のビームで直流的に連続して衝撃すると、約 3 分で出力が半分に低下した。しかし同一条件のビームで 16 $\times$ 12mm² の面積を走査した場合、約 1 時間経過しても出力の低下は認められず、そのご何回か実験しているが変化はない。標準方式にしたがって走査を行なうと、同一点を 1/30 秒に 1 回、約 0.1 μ s しか衝撃されないから、連続に衝撃した場合の 300,000 倍以上の寿命があるはずである。

5. むすび

以上、電子ビームと面状の半導体ダイオードとを組合わせた新しいパターン発生管 EVOSCOPE についてのべた。Electron Voltaic Effect は高速度、高出力の電流増幅が得られるが、この現象に、このような応用の方法もあるという一例である。現在、一応映像を出すことに成功した段階であって、解像度などまだまだで解決すべき問題は多々あるが、性能向上の可能性は十分ある。今後は面状半導体ダイオードにパターンを描く方法、シールドした管の製作、付属回路の改善をはかるとともに理論上考える性能を發揮するよう実験を進めたい。

最後に御指導、御鞭撻いただいた宮地博士、半導体ダイオードの作成に努力された内藤宏之、西村忠郎の両君、実験測定に協力された兼子昌彦君、実験管の製作に尽力された試作室の各位に感謝する。(昭和 38 年 5 月 12 日受付)

[参 考 文 献]

- 1) 宮地、宮崎、内藤：昭 38 電気四学会連合大会，No. 1413.
- 2) Ehrenberg, et al: Proc Phys. Soc., London, 64 (1951), 424.
- 3) Takeya, Nakamura: J. Phys. Soc. Japan, 13, (1958), 223.
- 4) 宮地、宮崎、内藤：昭 36 電気通信学会全国大会，No. 305.
- 5) 宮地、宮崎、内藤：昭 37 電気四学会連合大会，No. 1015.
- 6) 宮地、宮崎、内藤：昭 37 電気通信学会全国大会，No. 317.
- 7) Miyazaki, Miyaji: Japan, J. Appl. Phys. 2 (1963), 130.
- 8) Miyaji, Miyazaki, Umeoka: Proc. I EEE., 51 (1963), 483.
- 9) White, Sheffield: Proc. IRE., 50 (1962), 1523.
- 10) Horton: IBM. J., 6 (1962), 437~448.
- 11) Brown: IEEE Trans. ED, ED-10, (1963), 8~12.
- 12) Rappaport, et al: RCA Rev., 20 (1956), 100~128.
- 13) McKay: Phys. Rev., 84, (1951), 829~832.
- 14) Mann, et al: IRE Tran. NS, NS-8, (1961), 151~156.
- 15) Terrill: Phys. Rev., 24, (1924), 616~621.