円筒状P-N接合のバラクタ特性

Varactor Characteristics of a P-N Junction with Cylindrical Geometry

生* Tsugio Makimoto

円筒状の P-N 接合で、空間電荷層が内側にのびる場合の可変容量特性について理論的に検討した。接合の 半径 r_0 , 不純物濃度 N_a および誘電率 ε とすれば,接合容量 (C_i) の電圧依存性は,

$$V_{A} = \frac{q \cdot N_{d}}{4 \varepsilon} \cdot r_{0}^{2} \left\{ \frac{-4 \pi \varepsilon}{C_{j}} \cdot \exp\left(\frac{-4 \pi \varepsilon}{C_{j}}\right) + 1 - \exp\left(\frac{-4 \pi \varepsilon}{C_{j}}\right) \right\}$$

によって示される。この数値計算結果によれば、円筒状接合は平面接合に比べて、はるかにすぐれたバラクタ 特性を有していることがわかった。また、逆方向の Break-down が起こるときの最大電界強度を E^*_{\max} とすれ

$$E_{
m max}^{m{*}}\!>\!rac{q\!ullet\!r_0\!ullet\!N_d}{2\,arepsilon}$$

が設計可能な r_0 と N_d の関係になることを示した。

1. 緒

Micro-wave 領域における増幅に対して、 可変容量素子が注目さ れている。これは、容量の電圧依存性を利用して、パラメトリック 増幅器に使われ, 低雑音がその大きな特長とされている。このよう な P-N 接合の可変容量特性については,最近,理論的検討を中心に して多くの報告が見られるようになった(1)~(3)。

従来, バラクタ (可変容量ダイオード) の設計については, 幾何 学的構造に関するものや、不純物分布に関するものなどがある。特 に後者については、超階段形接合(4)が考案され、それを可能にする

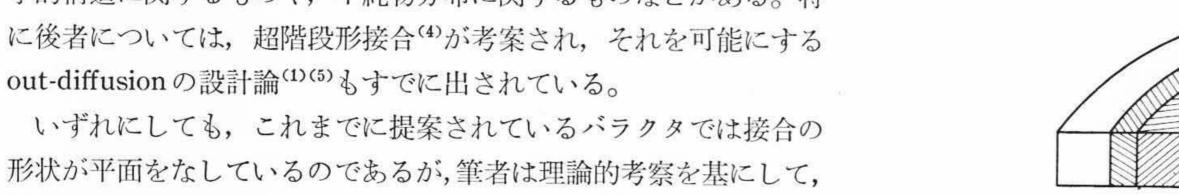
いずれにしても、これまでに提案されているバラクタでは接合の 形状が平面をなしているのであるが,筆者は理論的考察を基にして, 接合の形状が円筒状のバラクタを提案した(6)。円筒状接合において 空間電荷層が印加電圧の増加とともに, 内側にのびる場合, 同時に 空間電荷層の一端の面積も自動的に減少する。したがって平面接合 の場合に比べ、電圧依存性が大きくなることは、単純な思考からも 予想されるところである。

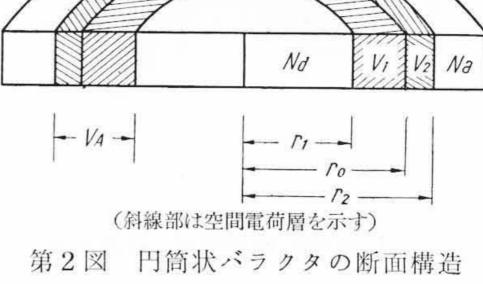
本文においては、円筒状接合の空間電荷層におけるポアソンの方 程式を解いてポテンシャルを求め、接合容量を計算した。その結果 予想どおり, 平面接合に比べ容量の電圧依存性がはるかに大きくな ることを確認した。また、接合の内側の不純物濃度および接合半径 の設計理論についても触れた。なお、解析は静的な場合にとどめ動 特性および製作技術については一切省略した。

2. 構 造

第1図は円筒状バラクタの一例を示す。円筒状単結晶の表面に P+-N 接合(あるいは N+-P 接合) を形成し、そののちに中心部分 にワックスを塗布してエッチングを行なえば図のような製品が得ら れることになる。

また, **第2**図は接合の外側にアクセプタ(N_a), 内側にドナー(N_d) をもつ接合の断面図の構造を示している。接合の位置は $r=r_0$ にあ り、印加電圧 V_A のとき、空間電荷層の両端の位置はおのおの $\gamma=$ r_1 および $r=r_2$ である。また接合より内側のポテンシャルを V_1 ,外 側のそれを V_2 とした。不純物分布は第3図に示すような階段形で $N_a \gg N_d$ と仮定した $(N_d \gg N_a)$ の場合でも結果は suffix の変更だ けで十分である)。





第1図 円筒状バラクタの一例

 $\Gamma = \Gamma_0$ (接合)

(図はP+-N接合の場合を示す) 第3図 円筒状バラクタの不純物分布形

3. 理論的検討

ポテンシャルを求めるためには,空間電荷層においてポアソンの 方程式(**)を解けばよい。

ここに p^2 : Laplacian ρ : 電荷密度

V: ポテンシャル ε : 半導体の誘電率

日立製作所武蔵工場

 Γ^2 を二次元の円筒座標 (r, φ) で表現すれば (8)

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{r}^2} + \frac{1}{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} + \frac{1}{\mathbf{r}^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \dots (2)$$

しかるにポテンシアルは、φによらないから、結局(1)式は(3) または(4)式のようになる。

$$\frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dV}{dr} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \qquad (3)$$

$$\frac{dE}{dr} + \frac{1}{r} \cdot E = -\frac{\rho}{\varepsilon} \dots (4)$$

ここに $E = \frac{dV}{dr}$: 電界強度

(4)式より結局次の一般解が得られる。

$$E = \frac{A}{r} - \frac{\rho}{2\varepsilon} \cdot r \qquad (5)$$

$$V = A \log r - \frac{\rho}{4 \varepsilon} \cdot r^2 + B \qquad (6)$$

ここに、AおよびBは積分定数である。

境界条件は次のようになる。

$$\begin{cases} \frac{d V_1}{dr} = 0 & \text{at } r = r_1 \dots (7) \\ \frac{d V_2}{dr} = 0 & \text{at } r = r_2 \dots (8) \\ V_1 = V_2 = 0 & \text{at } r = r_0 \dots (9) \end{cases}$$

これらを満足するように積分定数を定めると、 V_1 および V_2 は次 のようになる。

$$V_1 = \frac{q \cdot N_d}{4 \varepsilon} \left\{ 2 r_1^2 \log \frac{r}{r_0} + (r_0^2 - r^2) \right\} \dots (10)$$

印加電圧 V_A の関数として、 r_1 および r_2 を定めるには、中性条件 を用いる。

$$\int_{r_1}^{r_0} 2\pi r \cdot N_d \cdot dr = \int_{r_0}^{r_2} 2\pi r \cdot N_a \cdot dr \dots (12)$$

$$N_d(r_0^2 - r_1^2) = N_a(r_2^2 - r_0^2) \qquad (13)$$

また印加電圧は

$$V_{A} = V_{1}(\mathbf{r}_{1}) - V_{2}(\mathbf{r}_{2})$$

$$= \frac{q}{2 \varepsilon} \left(N_{d} \cdot \mathbf{r}_{1}^{2} \log \frac{\mathbf{r}_{1}}{\mathbf{r}_{0}} - N_{a} \cdot \mathbf{r}_{2}^{2} \log \frac{\mathbf{r}_{0}}{\mathbf{r}_{2}} \right) \dots \dots \dots (14)$$

したがって, (13) および (14) 式を超越連立方程式として解けば r_1 および r_2 の厳密解を得ることができる。しかし、ここでは $N_a \gg N_d$ であるから,次式を証明することができる。

すなわち, 展開公式によって

$$\log \frac{r_1}{r_0} = -\frac{r_0 - r_1}{r_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{r_0 - r_1}{r_1} \right)^2 \quad \dots (16)$$

$$\log \frac{\boldsymbol{r}_0}{\boldsymbol{r}_2} = \frac{\boldsymbol{r}_0 - \boldsymbol{r}_2}{\boldsymbol{r}_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\boldsymbol{r}_0 - \boldsymbol{r}_2}{\boldsymbol{r}_2} \right)^2 \quad \dots \tag{17}$$

これらをおのおの(10)および(11)式に代入して

$$V_1(\mathbf{r}_1) = \frac{q N_d}{2 \varepsilon} (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1)^2 \dots (18)$$

$$V_{2}(\boldsymbol{r}_{2}) = \frac{q N_{a}}{2 \varepsilon} (\boldsymbol{r}_{2} - \boldsymbol{r}_{0})^{2} \dots (19)$$

また中性条件の(13)式より

$$N_{a} (\mathbf{r}_{2} - \mathbf{r}_{0}) = \frac{\mathbf{r}_{0} + \mathbf{r}_{1}}{\mathbf{r}_{2} + \mathbf{r}_{0}} (\mathbf{r}_{0} - \mathbf{r}_{1}) \cdot N_{d} < (\mathbf{r}_{0} - \mathbf{r}_{1}) \cdot N_{d} \dots (20)$$

$$(\mathbf{r}_{2} - \mathbf{r}_{0}) < (\mathbf{r}_{0} - \mathbf{r}_{1}) \cdot \frac{N_{d}}{N_{a}} \ll (\mathbf{r}_{0} - \mathbf{r}_{1}) \dots (21)$$

$$(r_2-r_0)<(r_0-r_1) \cdot \frac{N_d}{N_a} \ll (r_0-r_1) \dots (21)$$

(20)および(21)式の左端および右端の項をかけあわせて

$$N_a (r_2 - r_0)^2 \ll N_d (r_0 - r_1)^2 \dots (22)$$

この関係と(18)および(19)式とから(15)式が証明されたことにな る。したがって r_1 と V_A との関係は次式で与えられる。

$$V_{A} = \frac{q \cdot N_{d}}{4 \varepsilon} \cdot r_{0}^{2} (2 \rho^{2} \log \rho + 1 - \rho^{2}) \dots (23)$$

次に接合容量(C_i)は定義によって

$$C_{j} = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{dr} \cdot \frac{dr}{dV}....(24)$$

$$\left(\frac{dQ}{dr}\right)_{r=r} = -2 \pi q \cdot N_d \cdot r_1 \dots (25)$$

$$\therefore C_j = \frac{-2 \pi \varepsilon}{\log \rho}, \quad \rho = \frac{r_1}{r_0} \quad \dots \tag{27}$$

(23)式と(27)式よりρを消去すると

$$V_{A} = \frac{q \cdot N_{d}}{4 \varepsilon} \cdot r_{0}^{2} \left\{ -\frac{4 \pi \varepsilon}{C_{j}} \cdot \exp\left(\frac{-4 \pi \varepsilon}{C_{j}}\right) + 1 - \exp\left(\frac{-4 \pi \varepsilon}{C_{j}}\right) \right\}$$

$$(28)$$

(28)式は接合容量の電圧依存性を示す最終的な表現である。

最後に電界強度について考察する。平面接合の場合と同じく, 円 筒状接合においても最大電界強度 (E_{max}) は接合部 $(r=r_0)$ において 起こることが証明できる。

$$E_{\text{max}} = \left| \left(\frac{dV_1}{dr} \right)_{r=r_0} \right| = \frac{r_0 \cdot q \cdot N_d}{2 \varepsilon} \cdot (1 - \rho^2) \dots (29)$$

4. 数值計算結果

以下,数値計算はすべてゲルマニウムに対して行なったものであ

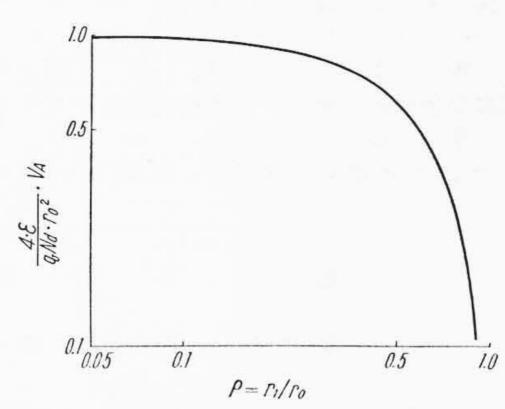
第4図は(23)式の数値計算結果である。横軸は $\rho=r_1/r_0$ であるか ら、空間電荷層の一端と印加電圧との関係を示すことになる。ρが 零に向うときは、 $\rho^2 \log \rho \rightarrow 0$ であるから

$$\lim_{\rho \to 0} V_A = \frac{q N_d}{4 \varepsilon} r_0^2 \qquad (30)$$

(30)式は、接合の内側がすべて空間電荷層になってしまう条件(一 種の punch-through 状態)を示す式である。

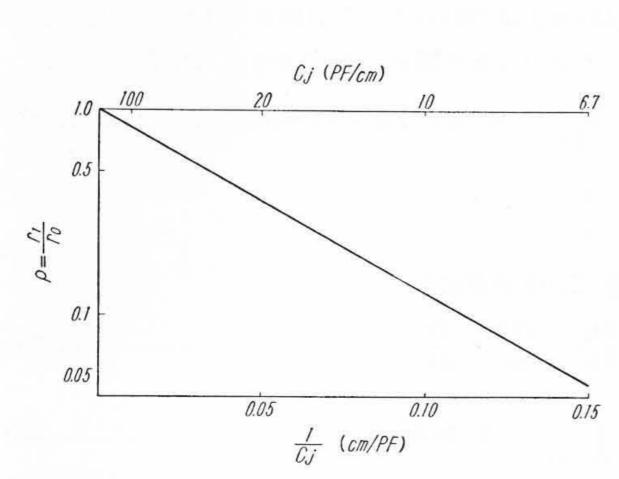
第5図は(27)式の計算結果である。 $\log \rho \ge 1/C_i$ が直線関係にあ ることを示している。

第6図は(28)式によって、接合容量の電圧依存性を示す。比較の ために, 平面接合における階段形接合と傾斜形接合の容量の電圧依 存性を記した(9)。図から明らかなように、円筒状接合の可変容量特 性はきわめてすぐれており、特に高い電圧の部分でこう配が大きい。

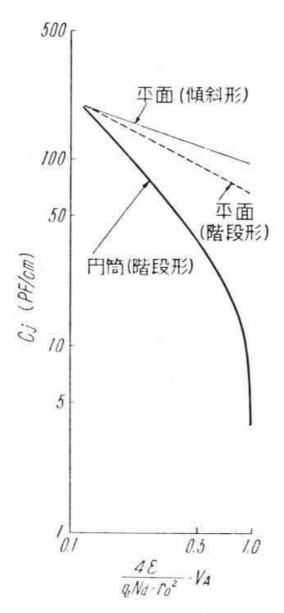


印加電圧と空間電荷層の位置(ア1)との関係 ((23)式の計算結果)

H

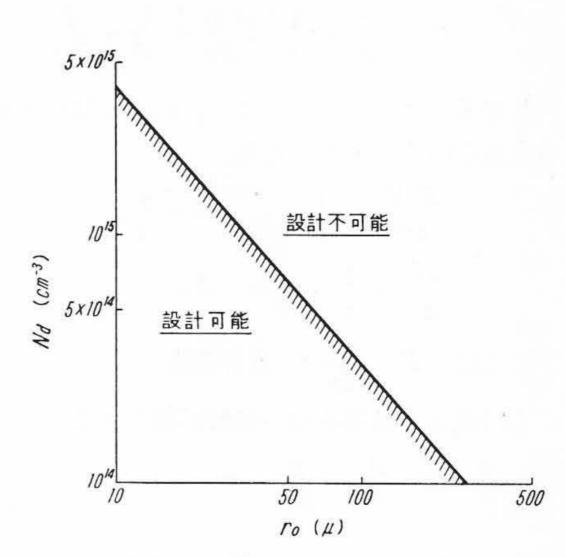


第5図 接合容量と空間電荷層の位置との関係 ((27)式の計算結果)



第6図 接合容量の電圧 依存性(実線) 点線および一点鎖線は, おのおの 平面接合の階段形および傾斜形の場

合を示す。実線は(28)式の計算結果



第7図 N_d と r_0 の設計可能な領域と設 計不可能な領域を示す ((31)式の計算結果)

接合の逆バイアスを増して、 Emax が不純物濃度によってきまる ある値 E_{max}^* に達すると、逆特性に、いわゆる Breakdown が起こ る。 $r_1=0$ になっても Breakdown が起こらないようにするために は、(29)式で ρ=0 とおいて

$$E_{\max}^* > \frac{r_0 \cdot q \cdot N_d}{2 \varepsilon}$$
....(31)

したがって、 r_0 と N_a が(31)式の条件を満すとき、このようなダ イオードの設計が可能になる。第7図は(31)式を判定基準にして設 計可能な領域と設計不可能な領域とを示したものである。 E^*_{max} は 文献(10)のデータを若干外そうして求めた。

5. 結

円筒状接合の可変容量特性について理論的な検討を行ない, ゲル マニウムの場合について数値計算を行なった。接合容量の電圧依存 性は(28)式で示されるが、計算結果を平面接合の場合と比較すると きわめてすぐれたバラクタ特性を有しており、特に印加電圧が高い ところの特性がすぐれていることがわかる。

また接合の半径と不純物濃度が(31)式を満足するときは、punchthrough 状態まで電圧を印加することが可能である。

このような素子の実現にあたっては、製作技術上いくつかの問題 があるかも知れない。しかし、半導体工業が急速に進歩しているこ とを考えると, 近い将来に可能になるときがくると考えられる。

最後にご激励を賜わった中村純之助博士, 阿部享氏および田宮幸 造氏に深く感謝する。

文

- (1) J. Hilibrand et al: RCA Review, 21, 457 (1960)
- (2) K. E. Mortenson: J. Appl. Phys., 30, 1542 (Oct. 1959)
- R. C. Knechtli et al: J. Appl. Phys., 31, 1134 (June 1960)
- MacMahon et al: IRE Wescon Conv. Rec., II, Part 3 (1958)
- J. Halpern et al: Proc. IRE, 46, 1068 (June 1958)
- 牧本次生: 特許「半導体容量素子」出願番号 36-25079 (6)
- 大井鉄郎: 偏微分方程式とその応用 23 (昭-32 コロナ社) (7)
- 犬井鉄郎: 偏微分方程式とその応用 154 (8)
- (9) 川上正光: 電子回路 V 80 (昭-33 共立)
- (10) R. D. Knott et al: Proc. Phys. Soc., 68 B, 182 (1952)

Vol. 7 1962 日 立

目次予告

- 「電気時代と私」………東山千栄子
- ステンレスを圧延するセンジミアミル
- 躍 進 す る 日 立 A 形 エ レ ベ ー タ
- レールトラクタ
- は 空気 6
- 理想的な金型彫り機 ——2次元ならいフライス盤—— 立モートル
- 日立ハンディポンプを使った楽しい夏の水遊び
- 用途の広いトランジスタ化 ITV
- ・高分子がつくるデラックスな空間の設計
- 電線百話 「ミリ波を伝えるラセン導波器」
- 日立ハイライト「"ワイドスクエア"テレビ」
- 明日への道標「西武デパートロサンゼルス店納エスカレ ータ
- · H 立

発 行 所 立 評 社

取 次 店 株式会社 オーム社書店 東京都千代田区丸の内1丁目4番地 振 替 口 座 東 京 71824 番 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 振 替 口 座 東 京 20018番