

7.4 シリコン半導体検出器の原理

近年急速にシリコン半導体産業が発達し、高エネルギー実験にも 1880 年代から応用されるようになった。シリコン半導体検出器の最大の魅力は、荷電粒子の飛跡を位置精度 20 ミクロン以下で測定できること、室温でも使用できること、また放射線に強いことである。

7.4.1 シリコン半導体

シリコン結晶では、荷電子帯 (valence band) と伝導帯 (conduction band) の間に 1.1 eV (Ge では 0.7 eV) の禁止帯が存在する。0 K では荷電子帯は電子が満ちているが、温度が上がると原子の振動エネルギーが電子に分配して割り当てられ平均 kT のエネルギーを電子が得てそのエネルギー分布は

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right)} \quad 7-19$$

で与えられる。不純物のない真性半導体では n 個の電子が伝導帯に、 p 個の空孔が荷電

子帯に励起される:

$$n = N_C \exp\left(-\frac{\epsilon_C - \epsilon_F}{kT}\right), \quad p = N_V \exp\left(-\frac{\epsilon_F - \epsilon_V}{kT}\right) \quad 7-20$$

N_C と N_V は伝導帯と荷電子帯の状態数で室温ではそれぞれ $2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である. $n = p$ という電荷中性条件があり $N_C \sim N_V$ なので Fermi Level は禁止帯のほぼ中央に位置し電子と空孔の数 n_i は近似的に

$$n_i = \sqrt{N_V N_C} \exp\left(-\frac{\epsilon_G}{2kT}\right) = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad 7-21$$

である ($\epsilon_G = 1.1 \text{ eV}$). n_i の値は温度が高いと大きくなり伝導度が良くなる.

純粋な結晶に加える不純物には3価の原子(B, Ga, In)の p 型不純物、5価原子(P, As, Sb)の n 型不純物がある. p 型不純物は空孔(ホール)を n 型不純物は自由電子をつくり、図 7-11 のようにそれぞれ acceptor level と donor level に収まっているが、室温では殆どが荷電子帯と伝導帯に励起されて電気伝導度に寄与する. それぞれの密度を p , n 個とすれば、

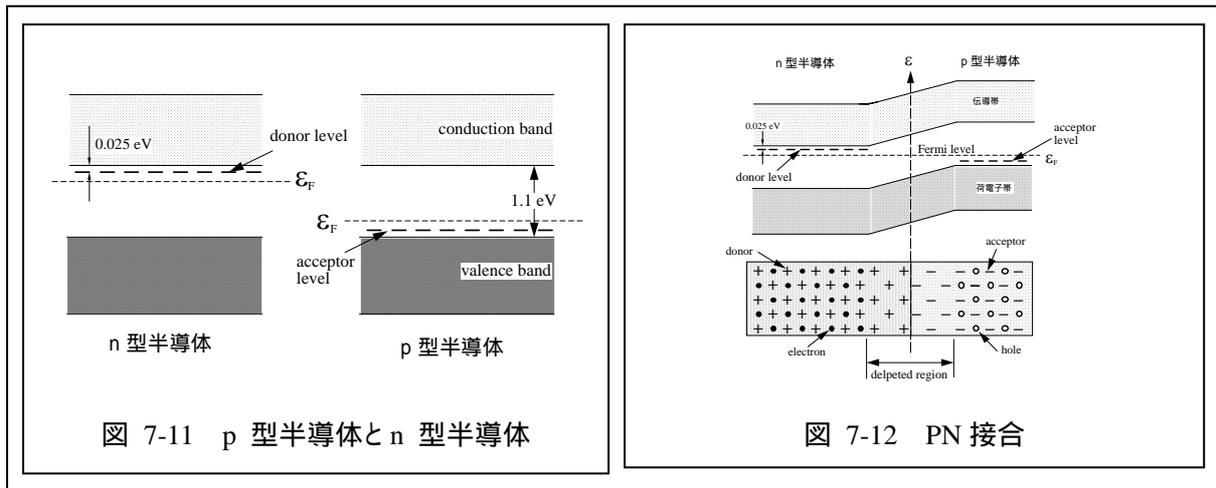
$$\begin{aligned} \text{n 型半導体:} \quad n_n &\approx N_D, \quad p_n \approx n_i^2 / N_D \\ \text{p 型半導体:} \quad p_p &\approx N_A, \quad n_p \approx n_i^2 / N_A \end{aligned} \quad 7-22$$

ここで N_D, N_A は donor と acceptor の密度である. 半導体の伝導度 σ または比抵抗 ρ は電子とホールの mobility μ を使って

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}, \quad \rho = \frac{1}{q\mu_n N_D}, \quad \rho = \frac{1}{q\mu_p N_A} \\ \mu_n &\approx 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}, \quad \mu_p \approx 500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \text{ at room temp} \end{aligned} \quad 7-23$$

シリコン半導体検出器に使われる半導体は真性に近いものである.

$$N_D \approx 10^{12} \text{ cm}^{-3}, \quad \rho \approx 4 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm} \quad 7-24$$



7.4.2 PN Junction

p 型半導体と n 型半導体を接合すると接合面で拡散電流が流れ、接合面の両側に空乏層 (depletion region) が形成され、両方のフェルミレベルが同じくなるように電位が生ずる(図 7-12) .

$$\phi_0 = \frac{kT}{q_e} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \quad 7-25$$

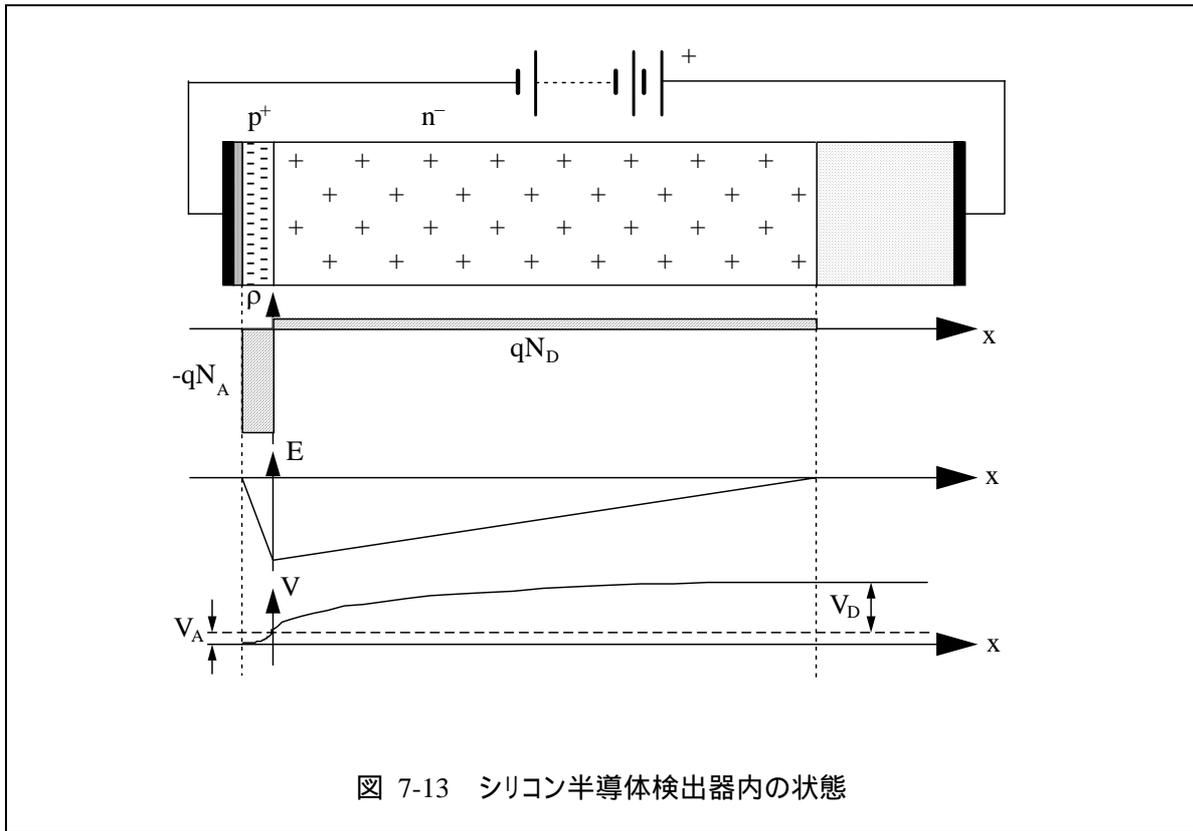
この接合面での空乏層の厚さは、外からかけた逆バイアス電位を V_R とすると

$$w_{depl} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q_e} (\phi_i + V_R) \left[\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right]} \quad 7-26$$

で与えられる . ふうシリコン半導体検出器では、高い比抵抗 (数 $k\Omega\text{cm}$, $N_D \sim 10^{12}$) の n 型シリコン半導体 p 側に高い濃度の p ドープを行う . したがって

$$\begin{aligned} w_{depl} &\approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q_e N_D} V_R} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8.85 \times 10^{-14} \text{ F} \cdot \text{cm}^{-1}}{1.6 \times 10^{-19} \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}} V_R} \approx 36 \mu\text{m} \cdot \sqrt{V_R} \end{aligned} \quad 7-27$$

これよりシリコン半導体の厚さの $300 \mu\text{m}$ を全て空乏化するに要する電圧は約 70 V であり手ごろな電圧であることがわかる . 図 7-13 に半導体検出器内での電場などの状態を図示した .



7.4.3 シリコンマイクロストリップ検出器

シリコン半導体のバルク内に作られた空乏層の中では電場が $100\text{V} / 0.3\ \mu\text{m} \sim 3\ \text{KV/cm}$ とかなり高い。粒子の通過によってできた自由電子が電極まで移動する時間は電子の mobility μ (式 (7-23)) から

$$t_{\max} = \frac{d}{v} = \frac{d}{\mu E} = \frac{0.03[\text{cm}]}{1350\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}\right] \cdot 3000\left[\frac{\text{V}}{\text{cm}}\right]} = 7.4\ \text{nsec} \quad 7-28$$

と非常に早い(ホールでも $20\ \text{ns}$)。この時間はバルク内での電子やホールの寿命($\sim 1\ \text{ms}$)より十分短いので殆ど全ての電荷量が信号として取り出せ、検出器として使える。

素粒子が通過するとその軌道に沿って平均 $80\ \text{個}/\mu\text{m}$ の電子・ホール対が励起される。両方の電荷が信号として出てくるので $80 \times 300 \times 2 \times e/2 = 24,000\ e = 3.8\ \text{fC}$ ($e/2$ は液体アルゴンの章参照) が積分信号量としてみえる。読出しエレクトロニクスの雑音レベル(約 $1000\sim 5000e$)を越えており、検出器側での増幅作用なしで信号が測定可能である。各々のストリップはワイヤーボンディングで独立の電子回路がつけられる。

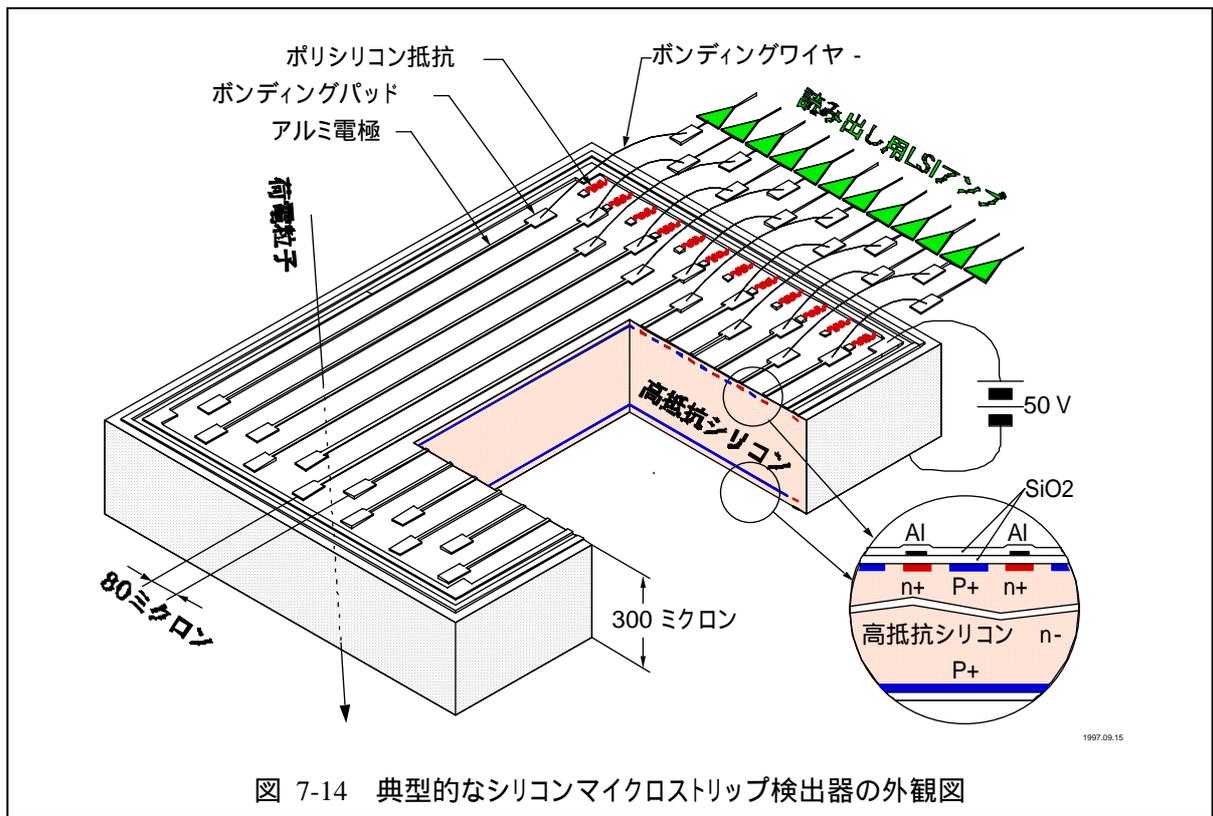


図 7-14 が最近の設計で AC-coupled のマイクロストリップ型検出器の概念立体図である。検出器の大きさは 6 cm X 6 cm 程度でストリップピッチは 80 μm 程度である。図 7-15 に 10 kW*cm のシリコンで作った検出器(300 μm 厚)の MIP に対する信号の電圧依存性を示した。電圧 20 V で全空乏化に達し電荷量もほぼ予想に近い。

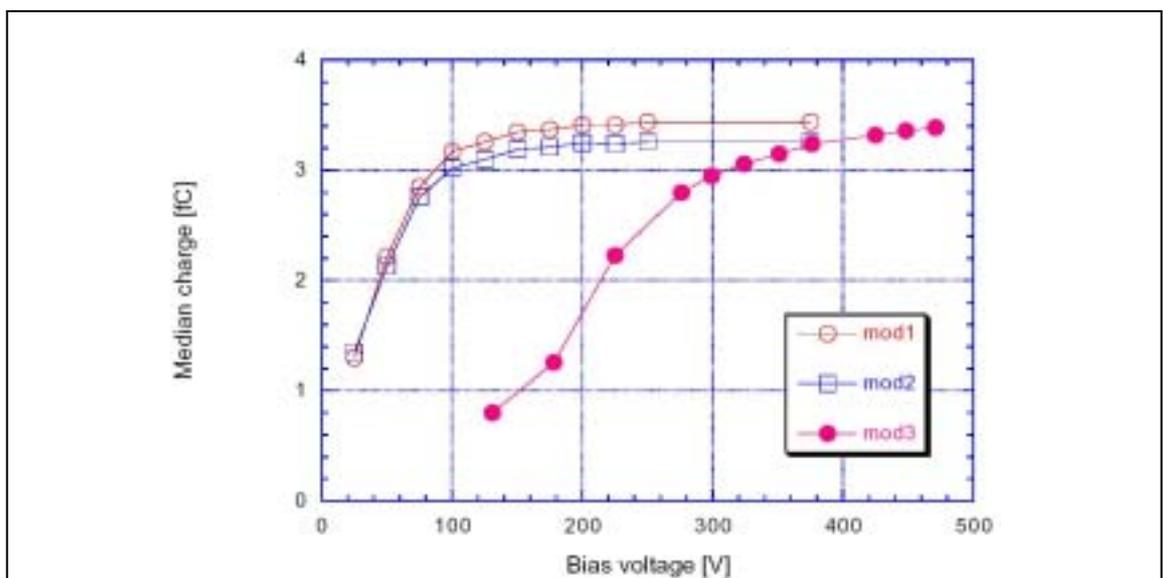


図 7-15 シリコンマイクロストリップ検出器(285 μm 厚)の信号電荷の電圧依存性。赤い点(mod3)は放射線を多量に受け、バルクが n タイプから p タイプに変化しかつ抵抗値が低くなったもの。