

シリコンセンサーの基礎

五十嵐 春紀

2009年6月3日

目的

PIN フォトダイオードに電圧をかけ PN シリコンの空乏化を調べる。空乏化によって生じる空乏層の厚みや低効率、静電容量を測定し特性を調べる。

1 原理

1.1 シリコンと PN 接合

シリコン (Si) は共有結合手を 4 本もち、純粋なシリコン結晶はエネルギー準位に充滿しており自由電子が存在しない。そのため金属とは違い絶縁物質である。しかし、リン (P) やヒ素 (As) などの共有結合手を 5 本もつ原子をシリコン結晶中にあると結合できない電子が発生する。この電子は少しのエネルギーで励起され自由電子となる。このためにシリコン結晶は伝導性を持つようになる。特にこのようなシリコンのことを n 型シリコンという。一方、ホウ素 (B) などの教習結合手を 3 本もつ原子を含めると結合できない空の軌道ができる。これはあたかも正の電荷の電子のようにふるまう。これをホールという。このシリコンを p 型シリコンという。

n 型と p 型のシリコンを結合すると、その結合付近はホールと自由電子が結合し電位に違いが生じる。この電位を内部電位 ϕ_{bi} とよぶ。これは通常 0.7V 程度である。結合後、ホールと自由電子がどちらも存在しない領域が生じ、これは空乏層と呼ばれる。

1.2 空乏領域の性質と空乏化電圧

結晶中の電子を励起させるエネルギー以上の光子が入る場合、ホールと自由電子対を生成する。空乏領域には他のホールや自由電子がほとんど存在しないために、電場が生じ再結合が起こる前に長い距離を走ることができる。これが電流となるため粒子の検出が可能になる。

シリコン内で発生する電化を効率的に測定するためには、シリコン検出器の厚みを完全に空乏化させる必要がある。その電圧を空乏化電圧 V_d と呼ぶ。

2 装置

PIN フォトダイオード、オペアンプ、バイアス電源、低周波発信器、低電圧電源、マルチメータオシロスコープ

3 手順

1. PIN フォトダイオード評価回路 (図 1) を自作する。

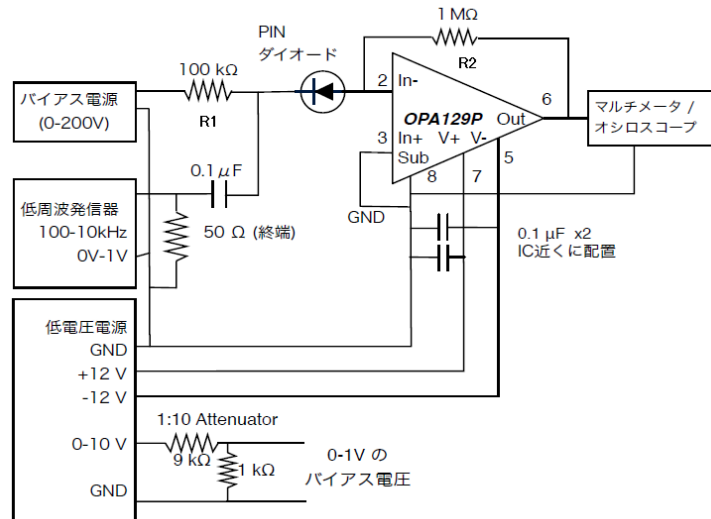


図 1 評価回路

2. ダイオードに順バイアス・逆バイアスをかけて直流特性を測る。
3. ダイオードに逆バイアス電圧をかけながら、静電容量を測る。周波数 F 、電圧 V の正弦波をコンデンサ C にかけると C に流れる電流 i は

$$i = 2\pi F C V \quad (1)$$

である。

4 実験結果

本実験は6月1日～6月3日に行われ、PIN フォトダイオードの特性評価は室温 21 の下で行った。

逆バイアスと順バイアスをかけたときの出力電圧をそれぞれ表 1 と表 2 にまとめ、そのグラフを図 2 と図 3 に示す。

ダイオードに直接かかる電圧 V_{diode} はバイアス電源 V_{in} から抵抗 R_1 にかかる電圧 ΔV を引いたものであるから

$$V_{diode} = V_{in} - \Delta V = V_{in} - iR_1 = V_{in} - \frac{R_1}{R_2} V_{out} \quad (2)$$

である。ここで $i = V_{out}/R_2$ の関係を用いた。 $R_1 = 100k$ 、 $R_2 = 1M$ より

$$V_{diode} = V_{in} - \frac{V_{out}}{10} \quad (3)$$

となる。

ダイオードに逆バイアスをかけたときの静電容量を測る。バイアス電圧をかけ、そのとき入力する正弦波の振幅と出力振幅、および出力周波数を表 3 にまとめる。これより静電容量 C は式 (1) より

$$C = \frac{i}{2\pi F V} = \frac{V_{out}/R_2}{2\pi F V} \quad (4)$$

で求まる。また空乏層の厚み d と静電容量 C の関係 $d = \varepsilon S/C$ と、低効率 Ω との関係 $d = \sqrt{2\Omega\varepsilon\mu_e(V_{bi} + \phi_{bi})}$ を用いることで

$$C = \frac{\varepsilon S}{\sqrt{2\Omega\varepsilon\mu_e(V_{bi} + \phi_{bi})}} \quad (5)$$

となり、静電容量と低効率の関係がわかる。そして、この抵抗率から不純物濃度 N_n

$$N_n = \frac{1}{e\mu_e\Omega} \quad (6)$$

が求まる。

例えば、バイアス 0.1075V、出力振幅 10.00kHz、入力振幅 64.0mV、出力振幅 2290mV とするとき、ダイオードの各値は以下ようになる。

ダイオード電流

$$I_{diode} = \frac{2290 \times 10^{-3}}{10^6} = 2.29 \times 10^{-6} = 2.29\mu A \quad (7)$$

静電容量

$$C = \frac{I_{diode}}{2\pi FV} = \frac{2.29 \times 10^{-6}}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times 64 \times 10^{-3}} = 569.5\text{pF} \quad (8)$$

抵抗率

$$\Omega = \frac{\varepsilon S^2}{2\mu_e(V_{bias} - \phi_{bi}C^2)} = \frac{1.05 \times 10^{-12} \times 1^2}{2 \times 1400 \times (0.1075 + 0.7) \times (569.5 \times 10^{12})^2} \quad (9)$$

$$= 1.43\text{k cm} \quad (10)$$

不純物濃度

$$N_n = \frac{1}{e\mu_e\Omega} = \frac{1}{1.609 \times 10^{-19} \times 1400 \times 1.43 \times 10^3} \quad (11)$$

$$= 3.1 \times 10^{12}\text{cm}^{-3} \quad (12)$$

よって、各バイアス電圧におけるダイオードの特性を表 4 にまとめる。バイアス対静電容量のグラフを図 4 に、逆二乗静電容量のグラフを図 5 に示す。

近似曲線は $0.1 < V_{bias}[V] < 9.95$ の範囲で求め $y[\text{pF}^{-2}] = 1.87 \times 10^{-5}x[V]$ と $70.0 < V_{bias}[V] < 150.0$ の範囲の平均値 $5.23 \times 10^{-4}\text{pF}^{-2}$ である。この交点は図 5 より

$$V_{depletion} = 28\text{V} \quad (13)$$

である。

5 考察

逆バイアスとなる電圧をかける (n 型シリコンに-、p 型シリコンに+) と n 型シリコンの自由電子が電源へ移動し、p 型シリコンのホールが電源からの伝導電子と結合する。すると n 型と p 型のホールと自由電子の数が減り、空乏領域が増えていくことになる。つまりバイアス電圧をかけていくと空乏化が起き空乏化電圧でシリコンの厚さに達する。実験結果より、電圧のかけ始めは効率よく空乏化が起きているが、40V 以上になると少しずつしか変化が得られていない。実際には空乏化電圧で出力電圧は一定になるはずが、そのようになっていない。これはシリコンが様な結晶構造をしておらず、底の部分に存在する不純物が空乏化を妨げているのではないかと考えられる。これは逆二乗静電容量のグラフ図 5 を見ても、わずかながらに容量が上昇していることからわかる。

一方、順バイアスとなる電圧をかけると n 型シリコンの自由電子は p 型シリコンへ、p 型シリコンのホールは n 型シリコンへ移動する。境界でホールと自由電子が結合しエネルギーは熱となる。減ったホールと自由電子はそれぞれ電源から供給されるので連続的に電流が流れることが可能である。図 3 から 0.3V 以上は入力電圧と出力電圧が比例関係を成しているので順バイアス方向の電圧をかけると同様な電流が流れていることがわかる。

表2 ダイオードの順バイアス電圧の出力電圧

表1 ダイオードの逆バイアス電圧の出力電圧			表2 ダイオードの順バイアス電圧の出力電圧		
バイアス [V]	出力電圧 [mV]	ダイオード電圧 [V]	バイアス [V]	出力電圧 [V]	ダイオード電圧 [V]
-0.1312	1.5	-0.13	0	0.0005	-0.00005
-0.1687	1.4	-0.17	0.0053	0.0006	0.00524
-0.973	1.5	-0.97	0.0105	0.0005	0.01045
-2.07	1.6	-2.07	0.0212	0.0000	0.0212
-4.06	1.8	-4.06	0.0303	-0.0005	0.03035
-6.05	1.9	-6.05	0.0397	-0.0014	0.03984
-9.98	2.0	-9.98	0.0500	-0.0028	0.05028
-15.02	2.2	-15.0	0.0603	-0.0046	0.06076
-19.94	2.2	-19.9	0.0703	-0.0074	0.07104
-25.1	2.3	-25.1	0.0798	-0.0112	0.08092
-29.9	2.4	-29.9	0.0898	-0.0171	0.09151
-34.9	2.4	-34.9	0.0999	-0.0244	0.10234
-40.0	2.5	-40.0	0.1503	-0.119	0.1622
-45.0	2.5	-45.0	0.200	-0.333	0.2333
-49.9	2.6	-49.9	0.300	-1.005	0.4005
-55.1	2.6	-55.1	0.400	-1.815	0.5815
-60.0	2.7	-60.0	0.499	-2.67	0.766
-64.9	2.7	-64.9	0.549	-3.12	0.861
-70.0	2.8	-70.0	0.599	-3.57	0.956
-75.1	2.8	-75.1	0.649	-4.02	1.051
-80.0	2.8	-80.0	0.699	-4.48	1.147
-85.0	2.8	-85.0	0.749	-4.94	1.243
-90.0	2.9	-90.0	0.799	-5.41	1.340
-95.1	2.9	-95.1	0.848	-5.87	1.435
-99.9	2.9	-99.9	0.898	-6.34	1.532
-110.0	3.0	-110.0	0.948	-6.81	1.629
-120.1	3.0	-120.1	0.998	-7.29	1.727
-130.0	3.1	-130.0	1.098	-8.23	1.921
			1.198	-9.19	2.117
			1.297	-10.14	2.311

表 3 逆バイアス電圧の入力振幅と出力振幅

バイアス [V]	出力振動数 [kHz]	入力振幅 [mV]	出力振幅 [mV]
0.1075	10.00	64.0	2290
0.505	9.988	64.0	1330
0.98	10.00	67.2	1040
1.504	10.01	67.2	880
2.04	9.997	67.2	785.2
2.48	10.00	66.8	720.6
2.95	9.997	67.2	673.4
4	9.997	67.2	589
5.01	9.999	67.2	484
5.98	10.00	67.2	396
7.01	10.00	66.8	372
7.98	10.00	66.8	348
9.01	10.00	66.8	328
9.98	9.996	66.8	312
15.02	10.01	66.8	262
20	10.01	66.8	232
25.1	10.00	66.8	212
30.1	10.00	66.8	204
35.1	10.00	67.2	198
40	9.998	66.8	196
49.9	9.994	66.8	191
60	9.999	67.2	189
70	9.997	67.2	188
80	9.993	66.8	187
90	10.01	67.2	186
100	10.01	67.2	184
110.1	10.02	66.8	184
120	9.994	67.2	183
130	10.03	66.8	184
140.1	10.01	67.2	182
150	10.00	67.2	182

表4 ダイオードの特性

ダイオード電流 [μ A]	静電容量 [pF]	抵抗率 [k cm]	不純物濃度 N_n [cm^{-3}]	厚み d[μ m]
2.29	569.5	1.43	3.10E+12	18.4
1.33	331.1	2.84	1.56E+12	31.7
1.04	246.3	3.68	1.21E+12	42.6
0.88	208.2	3.92	1.13E+12	50.4
0.7852	186.0	3.96	1.12E+12	56.4
0.7206	171.7	4.00	1.11E+12	61.2
0.6734	159.5	4.04	1.10E+12	65.8
0.589	139.5	4.10	1.08E+12	75.2
0.484	114.6	5.00	8.88E+11	91.6
0.396	93.8	6.38	6.96E+11	112.0
0.372	88.6	6.19	7.17E+11	118.5
0.348	82.9	6.28	7.06E+11	126.6
0.328	78.1	6.32	7.02E+11	134.4
0.312	74.4	6.35	6.99E+11	141.2
0.262	62.4	6.13	7.24E+11	168.4
0.232	55.2	5.94	7.47E+11	190.1
0.212	50.5	5.70	7.79E+11	207.9
0.204	48.6	5.15	8.61E+11	216.0
0.198	46.9	4.76	9.32E+11	223.9
0.196	46.7	4.22	1.05E+12	224.8
0.191	45.5	3.57	1.24E+12	230.6
0.189	44.8	3.08	1.44E+12	234.5
0.188	44.5	2.67	1.66E+12	235.7
0.187	44.6	2.34	1.90E+12	235.5
0.186	44.0	2.13	2.08E+12	238.6
0.184	43.5	1.96	2.26E+12	241.2
0.184	43.8	1.77	2.51E+12	240.0
0.183	43.4	1.65	2.69E+12	242.1
0.184	43.7	1.50	2.96E+12	240.2
0.182	43.1	1.44	3.09E+12	243.8
0.182	43.1	1.34	3.31E+12	243.6

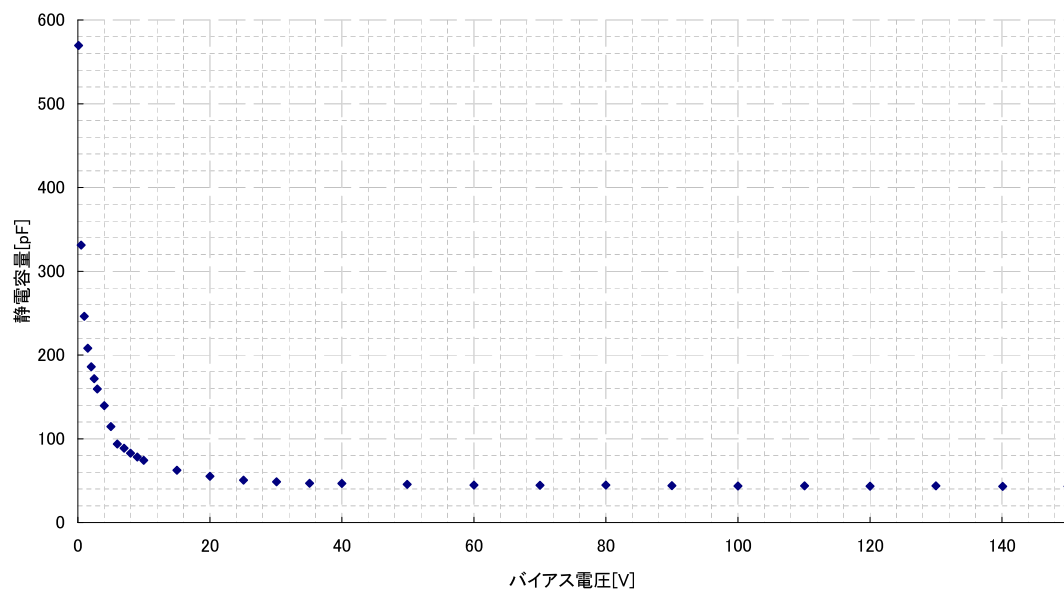


図 4 バイアス電圧 対 静電容量

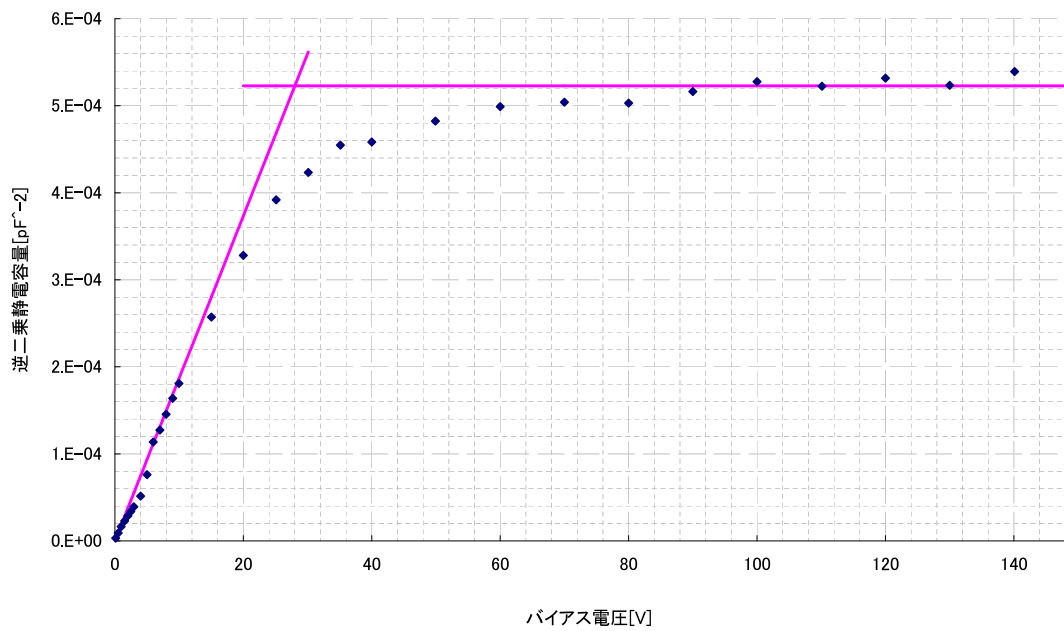


図 5 バイアス電圧 対 逆二乗静電容量