

トランジスタおよびダイオードの X線照射効果に関する研究

川畑 敬志*, 向坂 正勝**, 法沢 恵造**

Studies on the X-ray Irradiation Effects in Transistors and Diodes

By K. KAWABATA, M. SAKISAKA and K. NORISAWA

Characteristics of diodes and transistors by X-ray irradiation have been studied. The X-rays were obtained by the 2MV Van de Graaff accelerator of Kyoto University using the bremsstrahlung of 1.5 MeV electrons upon gold target.

The reverse current of 1S120 diodes increased gradually up to about 1×10^4 (rad (Si)) and steeply or rather steeply above this dose. The 70% recovery time was about 110 hours.

The gain of 2SC183 transistors operated actively at constant emitter current, generally degraded more according to larger collector-base current. The radiation damage of 2SC476 transistors was found greater than that of 2SC183, both under passive operation.

These facts would be attributed to the surface effect, that is, an increase of recombination velocity on the semiconductor surface.

1. 緒 言

前報^{1)~3)}において、トランジスタの中性子線照射による直流増幅率の変化について述べたが、今回はこれらの素子の表面効果を検討するために電子バンデグラフタイプの加速器VE-20(京都大学工学部)を用いて、⁶⁰Co1000キュリー相当の制動X線を発生させ、市販ダイオード(1S120)およびトランジスタ(2SC183, 2SC476)に照射し、これらの逆方向電流および直流増幅率の変化を調べた。その結果、ダイオードでは 1.0×10^4 (rad) Si付近から逆方向電流が増大し、また回復特性については照射後110時間後に70%まで回復することがわかった。さらに、トランジスタについては、各種バイアスを加えた状態で照射した場合について、直流増幅率の損傷度を比較検討した結果、エ

ミッター定電流ではコレクタ・ベース間の電圧 V_{CB} が大きいほど損傷が大きいことがわかった。

2. 実験装置および実験方法

Fig. 1 は、本実験に用いた実験装置の概略図を示す。ターゲットの中心直下2cmのところに回転試料台をおき、ターゲットの直下60cmのところにモニターをセットし、線量測定については、蛍光ガラス線量計を用いて Fig. 1 のA点および試料の位置B点にそれぞれ蛍光ガラスをおき比較校正して行った。

Fig. 2 は、トランジスタの特性測定回路を示したもので Photo. 1, Photo. 2 はそれぞれ回転試料台、特性測定装置を示す。

試料台に同時に4個の試料をとりつけ、それぞれの端子よりリード線を取り出して、測定を行った。また

* 広島工業大学電子工学科

**京都大学工学部

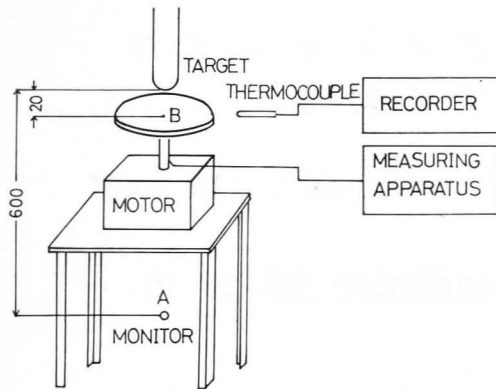


Fig. 1

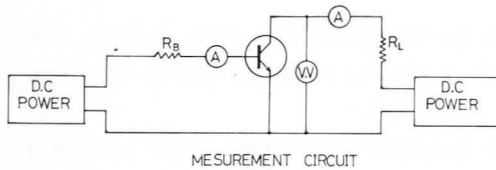


Fig. 2

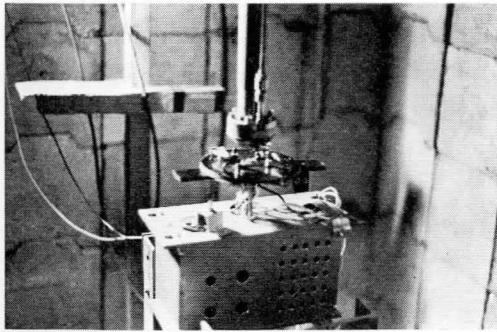


Photo. 1



Photo. 2

照射条件としては、加速電圧1.5MV、ビーム電流、 $50 \mu\text{A}$ 、X線束 $2.5 \times 10^4 \text{ R/min}$ 、測定および照射温度 $20^\circ \sim 21^\circ \text{C}$ で行った。

試料は、一般整流用ダイオード1S120(接合合金形Si)を60個用い、照射前に常温下($20^\circ \text{C} \sim 21^\circ \text{C}$)で、逆方向電圧 $V_R=25\text{V}$ 一定として逆方向電流を測定し、Table. 1に示すように、三段階(Group 1, Group 2, Group 3)に分け、これらの各グループの中から特性のそろったものをそれぞれ4個選択した。

次に、試料用トランジスタについては、中間周波増幅用2SC183(NPN Epitaxial planar型Si、マイクロディスク)を20個、高利得増幅用トランジスタ2SC476(NPN Epitaxial planar型Si、マイクロディスク)8個の2種類を用いて、照射中に各種バイアスを加えた場合とそうでない場合の直流電流増幅率 β の変化について検討した。

TABLE 1S120 DIODES

SAMPLE NO.	$I_R \times 10^7 (\text{A})$	GROUP	SAMPLE NO.	$I_R \times 10^7 (\text{A})$	GROUP	SAMPLE NO.	$I_R \times 10^7 (\text{A})$	GROUP
1	0.8	1	21	1.9	2	41	0.6	1
2	0.6	1	22	1.8	2	42	0.4	1
3	3.2	3	23	1.8	2	43	1.0	1
4	1.6	2	24	3.2	3	44	0.4	1
5	1.9	2	25	1.3	2	45	0.3	1
6	2.1	2	26	1.8	2	46	0.3	1
7	0.6	1	27	0.6	1	47	0.6	1
8	1.2	2	28	2.6	2	48	0.5	1
9	3.4	3	29	0.9	1	49	2.8	2
10	2.3	2	30	3.2	3	50	1.5	2
11	0.6	1	31	1.7	2	51	14.1	3
12	0.5	1	32	3.1	3	52	0.3	1
13	2.3	2	33	1.5	2	53	4.0	3
14	0.4	1	34	1.7	2	54	1.6	2
15	4.0	3	35	0.4	1	55	0.3	1
16	0.7	1	36	4.6	3	56	0.6	1
17	1.7	2	37	6.3	3	57	0.7	1
18	2.6	2	38	1.9	2	58	4.8	3
19	0.9	1	39	0.6	1	59	0.8	1
20	1.2	2	40	0.6	1	60	1.2	2

MEASURED AT REVERSE VOLTAGE $V_R=25(\text{V})$

Table 1

3. 実験結果およびその検討

Fig. 3は、積算照射量 ϕ に対するダイオードの逆方向電流の増加分 ΔI_R の変化を示す。これによると、照射量の増加にともない、逆方向電流は、ほぼ直線的に変化し、さらに逆方向電圧が増加するにしたがい、

電流も増大している。この電流の増加する要因として、体積再結合速度の増大の2つの要因が考えられる。特にX線照射の場合は中性子線照射の場合と違って、エネルギーが低い、したがって、bulk領域およびdepletion layer内のキャリアの発生および再結合による体積再結合速度の増大よりもむしろ、表面に再結合準位を生成し、これによる表面再結合速度の増大および表面反転層の形成による見掛け上の接合面積の増大によるものと考えられる。

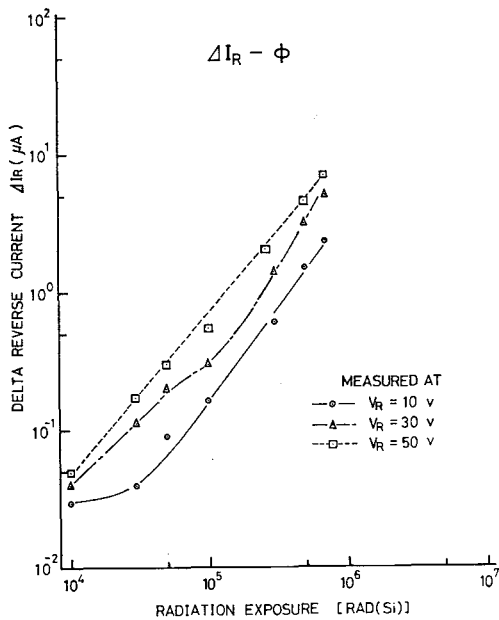


Fig. 3

Fig. 4 は、Group 1, Group 2, Group 3 に分類したダイオードについて、それぞれ4個の逆方向電流の増加分 ΔI_R の平均をとり、照射量 ϕ の関数として表わしたものである。これによると同種類のものでも明らかに損傷の度合は著しく異なっている。特に初期値の漏洩電流が大きいほど損傷は大きいことがわかった。Group 1 については 5.0×10^5 (rad) から損傷が著しく大きくなっているのに対して Group 3 では 1.0×10^4 (rad) からその傾向を示している。しかも、 5.0×10^5 付近から飽和現象を示している。このことは、同種類のダイオードでも、表面状態が非常に複雑で電気的特性が均一でないので、あらかじめ表面再結合速度が大きいものは、照射線量の増大にともない、ますます助長されるものと考えられる。

これらの損傷が Surface effects によるものか、あ

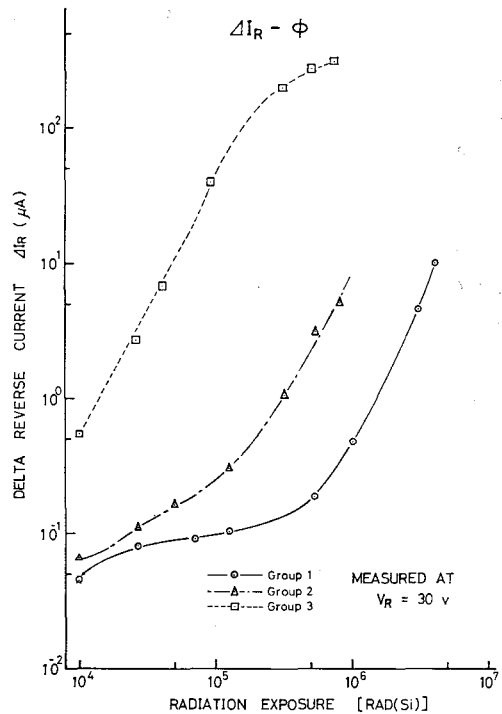


Fig. 4

るいは depletion layer 内にトラップ中心を生成し、これによる体積再結合速度を増大させるものであるかを確認するため、ダイオードを 1.5×10^6 (rad) まで照射した後、室温中における回復度について検討した。Fig. 5 は、照射後の経過時間に対する回復度を示したものである。この結果からわかるように、長時間にわたって回復し、約110時間後には約70%まで回復していることがわかる。したがって、このことから1.0

Characteristic of Recovery for 1S120 diode
Measured at Reverse Voltage $V_R = 25$ V

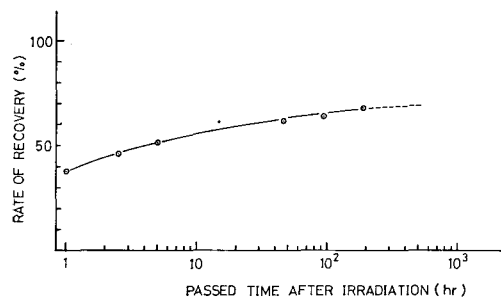


Fig. 5

$\times 10^6$ (rad)程度の照射量までは、displacement damage よりも surface damage による影響が大きいと言える。また、Fig. 5 の飽和現象は surface effects に限界があることを示している。

Fig. 6 は、トランジスタ 2SC183, 2SC476 について、積算照射 ϕ に対する直流増幅率 β の変化の割合を示す。この結果によると、2SC476の方が損傷度が大きいことを示している。2SC476の増幅率は2SC183のそれよりも非常に高い。したがって高利得トランジスタほど損傷度は大きい。

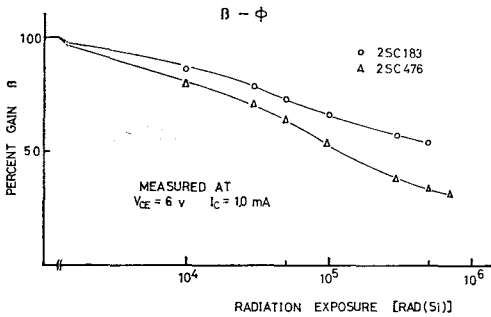


Fig. 6

Fig. 7 は 2SC183 にバイアスを加えないで、各線量ごとにコレクタ電流を変えて測定した場合の β の変化を示す。この Fig. 8 より、コレクタ測定電流が小さいほど β は低下していることがわかる。これは中性子線照射の場合と同じ傾向を示している。このことは定性的には当然予想されることで、結晶表面にトラップ中心を生じ、これがキャリアトラップ中心として働くので、キャリアの注入量が小さいほどトラップされる割合が大きくなり、ベース電流が増大し、増幅率が低下する。

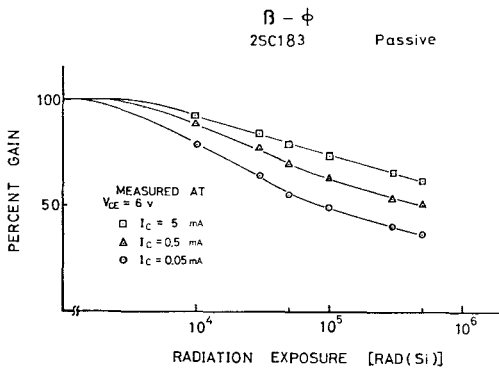


Fig. 7

次に Fig. 8 は、照射中にバイアスを加えた場合の各線量に対する damage factor $\Delta \frac{1}{\beta}$ の変化を示す。一般に、トランジスタの放射線による影響は、電気的な変化として、ベース電流の増大として現われてくる。この場合、放射線のエネルギーの相異によって、displacement effects, surface effects のいずれによるものかを区別して考えなければならない。この両者の damage factor $\Delta \frac{1}{\beta_T}$ とすると次式で与えられる⁴⁾。

$$\Delta \frac{1}{\beta_T} = \Delta \frac{1}{\beta_B} + \Delta \frac{1}{\beta_S} = K_B \phi + K_S \phi^n \quad (1)$$

但し $\phi < \phi_{sat}$

ここで、 $\Delta \frac{1}{\beta_B}$, $\Delta \frac{1}{\beta_S}$; bulk damage factor, surface damage factor.
 K_B , K_S ; bulk damage constant, surface damage factor.
 ϕ_{sat} ; 飽和線量

である。

Fig. 8 によると 1.0×10^5 (rad) まではいずれも直線的に変化し、それ以上になると飽和する傾向にある。従って、(1)式の surface effects 項の ϕ は 1.0×10^5 (rad) までと考えられる。しかし、これについてはエネルギーによっても異なるので、今後これらの点については充分検討を要する。バイアス電圧、電流の依存性について見てみると、エミッタ注入電流 $I_E = 0$ の場合、すなわち、エミッタを短絡した場合において、コレクタ・ベース間のバイアス電圧 V_{CB} が 6 (V) の場合と 12 (V) の場合とでは、ほとんど損傷は、 V_{CB} の電圧が増加するにしかたがって大きくなることを示している。この結果は P. R Measel⁵⁾ らの結果と一致している。

次に Fig. 9 はバイアス下における電流増幅率の電流依存性について示したものである。バイアスを加え

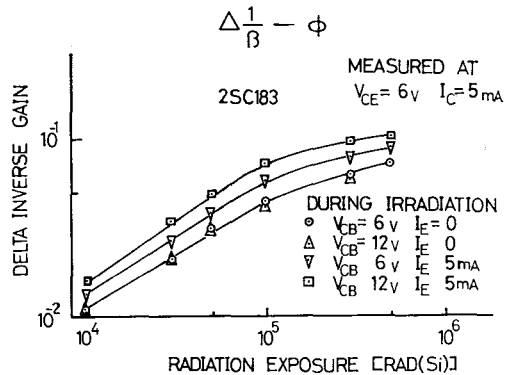


Fig. 8

た場合とそうでない場合とでは、前者の方が損傷を受けやすいことがわかる。しかし、電流依存性については損傷度の相違は十分に認められるにはいたらなかった。しかし、キャリアの高注入の場合と低注入の場合ではかなりの相違があると考えられるので、今後、この点についても、充分検討する必要がある。

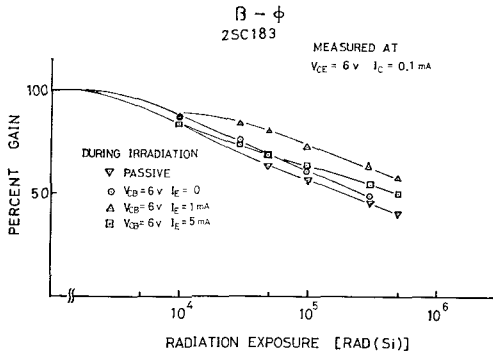


Fig. 9

4. 結 言

以上の結果から次のようなことが言える。

照射量が 1.0×10^4 (rad) Si までは、これらの素子はそれほど損傷をうけないが、それ以上になると、ダイオードおよびトランジスタについては、逆方向電流の増大、電流増幅率の低下となってあらわれてくる。

また、ダイオードの回復特性から、X線照射の損傷は主に surface effects によることがわかった。さら

にX線照射の場合の損傷度は常温下で長時間にわたって回復することもわかった。また、これらの surface effects には飽和する限界がある。

トランジスタについては、損傷度はエミッタに一定電流を流した場合のコレクタ・ベース間の電圧に依存する。すなわち、V_{CB}が大きいほど損傷度は大きい。しかし、電流依存性については確認することができなかった。

今後、γ線の高線量下における surface effects および displacement effects について検討する予定である。

最後に、本論文を書き終るにあたり、御助力いただいた京都大学工学部原子核工学教室の放射実験室の皆様感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 川畑敬志・他；広島工業大学研究紀要，第5巻2号，159~163，1971
- 2) 川畑敬志，北山正文；炉物理・炉工学分科会予稿集，C-41，1970
- 3) 川畑敬志，法沢恵造，向坂正勝；日本原子力学会年会要旨集，E-16，1971
- 4) W. Poch and A. G. Holmes-Siedle；IEEE Trans. on Nuclear Science NS-15 No. 6 213~223，1968.
- 5) P. R. Measel and P. R. Brown；IEEE Trans. on Nuclear Science NS-15 No. 6 224~231，1968.