

半導体の放射線損傷について〔Ⅱ〕

川畑 敬志, 北山 正文

On the radiation damage Semiconductor devices

By Keishi KAWABATA and Yoshifumi KITAYAMA

Recently semiconductor devices have been applied to electric equipments in a radiation environment. The electric properties of semiconductor devices are known to be sensitive to the lattice defects produced by irradiation of radiation ray.

The effects of thermal neutron radiation damage in various transistors on the market measured about V_{CE-Ic} , V_{CB-Ic} characteristics and h-parameters.

In this paper, the effects of radiation on high frequency transistors and low frequency transistors will be discussed, and results will show that high frequency type transistors are more resistant to radiation damage than low frequency type transistors.

I. ま え が き

半導体の放射線効果に関する研究は J. J. Loferski¹⁾, P. Rappaport²⁾, H. Fritzsche and K. Lark-Horvitz³⁾ らによって創められたが、物性面での格子欠陥と半導体素子の部品としての特性劣下を対象とする両極面からの研究が今日でも行われているが、放射線の種類、照射条件、測定条件、半導体素子自体の複雑な機構等によって、それぞれ著しく異なっている。^{4) 5) 6) 7)} 一般に実用面から半導体素子に影響を与える放射線源としては、原子炉の中性子線、 γ 線、各種加速粒子、さらに宇宙においては銀河系からの宇宙線、solar flare からの陽子、Van Allen 帯内外帯に捕獲された電子と陽子などがある。ここでは市販の各種トランジスタを京都大学原子炉(KUR)の傾斜照射孔(熱中性子 7.8×10^{11} [n/cm²·s] 速中性子 8.8×10^{10} [n/cm²·s]) で照射し、各種 h 定数を測定した結果、一般的に照射前に比べて著しく低下することがはっきりした。特に回路設計上、最も重要な電流増幅率が約半分に低下し、永久的な損傷となっていること

は注目にあたいる。

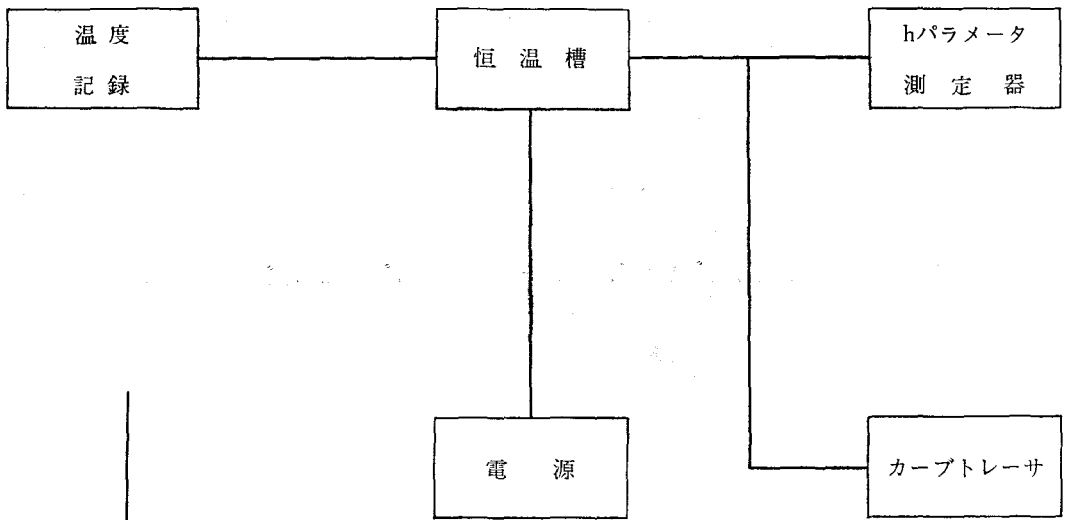
以下に昭和44年度上半期京都大学原子炉共同利用研究に参加して得た実験結果を記し、検討を試みる。

II. 実験装置及び実験方法

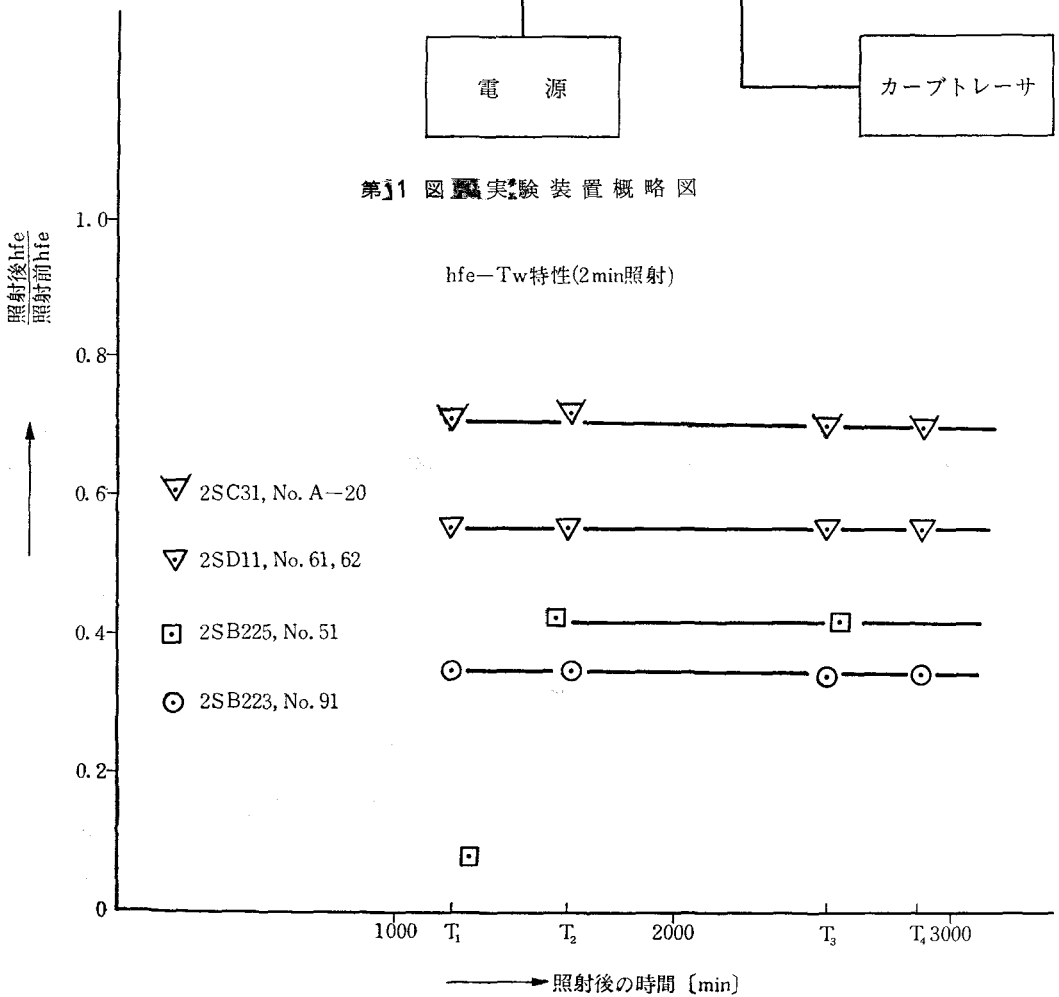
第1図はトランジスタの特性測定の概略図を示したもので、恒温槽内に試料を同時に5個入れて、それぞれの試料端子を外部回路と接続できるようにし、トランジスタの h 定数測定器及びカーブトレーサに接続して測定した。また槽内の温度は熱電対を用いて、常に常温に保たれているかどうかチェックした。

単結晶中の minority carrier のライフタイム測定には光パルスによる光伝導減衰法を用い、そのライフタイムをメモリスコープ上の波形から測定する。

次に試料の選択にあたっては、種々の要因によって放射線環境下では著しく特性が異なることが報じられているので、第1表に示すように、Ge, Si の低周波用から高周波用各種トランジスタを選択して試料として用いた。



第1図 実験装置概略図



第2図 hfe-Tw特性

第 1 表

品 名	構 造	用 途
2 S B223	Ge PNP Alloy	低周波高利得出力用
2 S B225	Ge PNP Alloy	低周波スイッチング用
2 S C31	Si NPN Eptaxial planar	高周波増幅, ビデオ増幅用
2 S D11	Ge NPN Alloy	低周波スイッチング用

照射条件としては常温で、熱中性子束 4.68×10^{13} , 2.808×10^{14} , 1.404×10^{15} [n/cm^2] の3条件で行なった。

Ⅱ. 実 験 結 果

第2図は2 S B223, 2 S B225, 2 S C31, 2 S D11 の4種類のトランジスタを2分間 (2.808×10^{14} n/cm^2) 照射した場合の照射後の経過時間に対する h_{fe} の変化を表わしたものである。

写真1. は2 S B223のトランジスタについて、カーブトレーサを用いて、照射前に測定したさいの $V_{CE}-I_C$ 特性で、写真2. は同一の試料を照射した後、47時間後に $V_{CE}-I_C$ 特性を測定したものである。

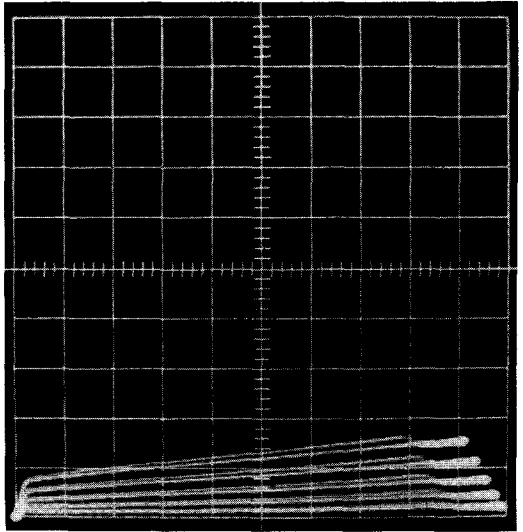


写真2 照射後 (2 S B223)
HOR. 1V/div
VER. 1mA/div
Step. $I_B=0.005mA$

写真3, 写真4は試料2 S B225 について、照射前と照射後44時間経過した後に、 $V_{CE}-I_C$ 特性を測定したもので、写真5は同一試料の照射後におけるコレクタ遮断電流を測定したものである。

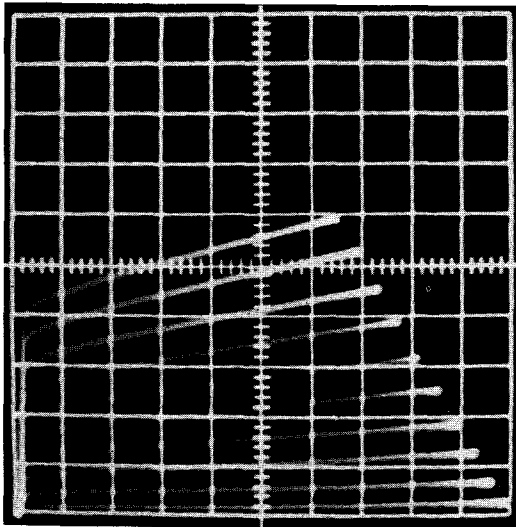


写真1 照射前 (2 S B223)
HOR. 1V/div
VER. 1mA/div
Step. $I_B=0.005mA$

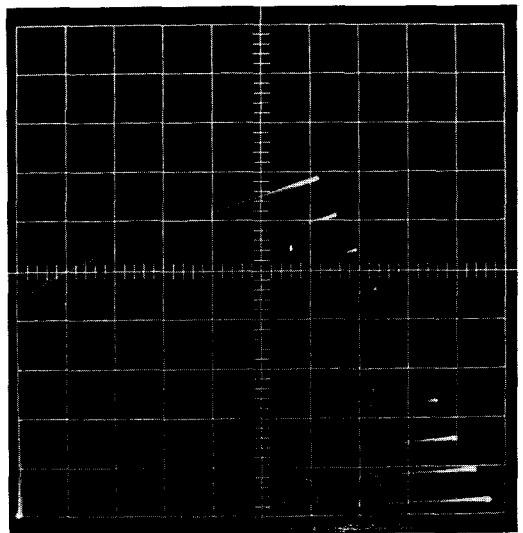


写真3 照射前 (2 S B225)
HOR. 2V/div
VER. 2mA/div
Step. $I_B=0.02mA$

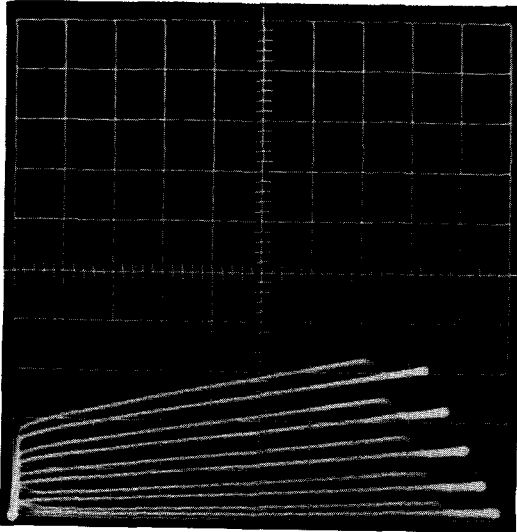


写真4 照射後 (2 S B225)
 HOR. 2V/div
 VER. 2mA/div
 Step. $I_B=0.02\text{mA}$

$-I_C$ 特性を示し、写真10、写真11は同一試料の照射前と照射後の $V_{CB}-I_C$ 特性を示したものである。

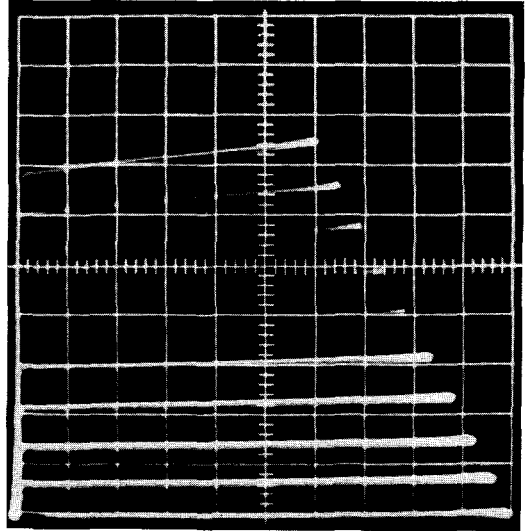


写真6 照射前 (2 S C31)
 HOR. 1V/div
 VER. 1mA/div
 Step. 0.02mA

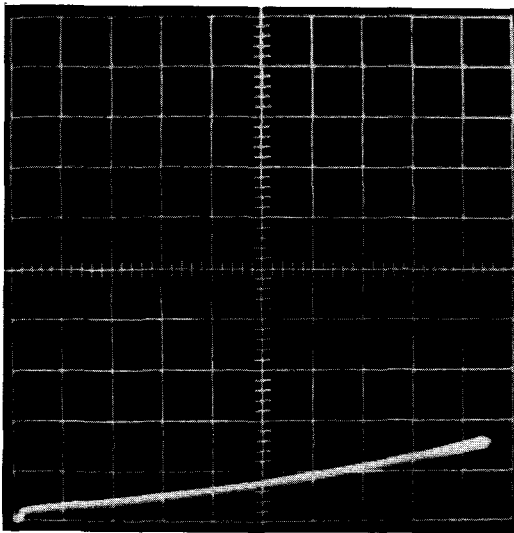


写真5 照射後 (2 S B225)
 HOR. 2V/div
 VER. 1mA/div

写真6、写真7は試料2S C31について、照射前と照射後の $V_{CE}-I_C$ 特性を測定したもので、写真8、写真9は試料2S D11について照射前と照射後の V_{CE}

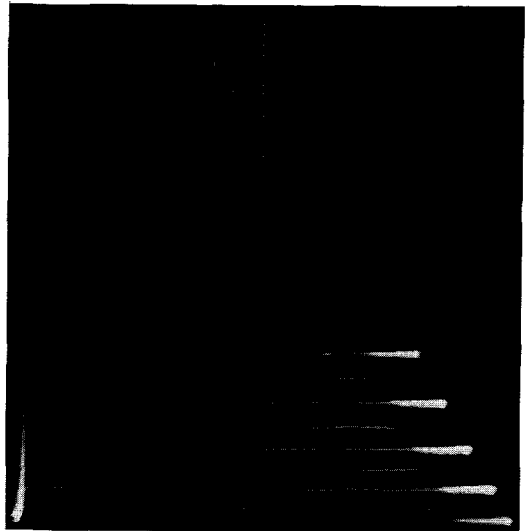


写真7 照射後 (2 S C31)
 HOR. 1V/div
 VER. 1mA/div
 Step. $I_B=0.02\text{mA}$

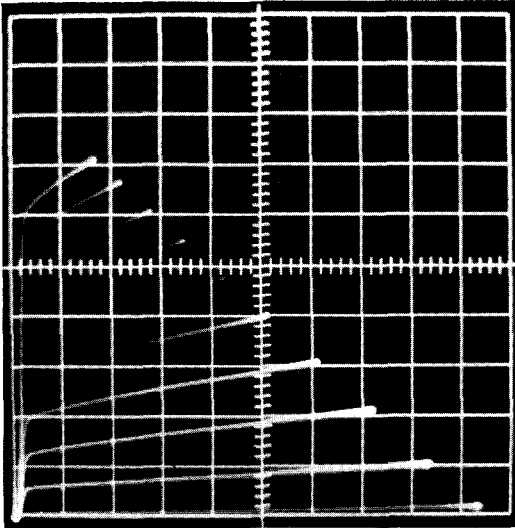


写真8 照射前 (2SD11)
 HOR. 1V/div
 VER. 5mA/div
 Step. $I_B = 0.02\text{mA}$

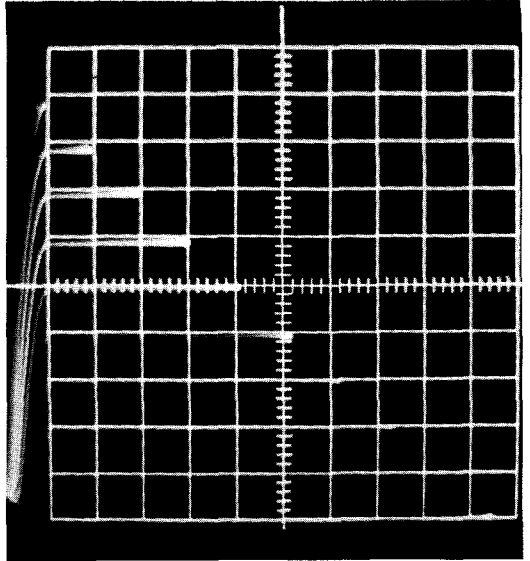


写真10 照射前 (2SD11)
 HOR. 1V/div
 VER. 5mA/div
 Step. $I_E = 5\text{mA}$

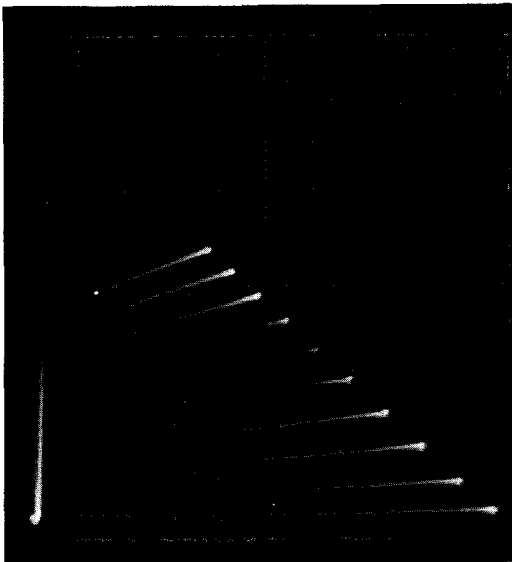


写真9 照射後 (2SD11)
 HOR. 1V/div
 VER. 5mA/div
 Step. $I_B = 0.02\text{mA}$

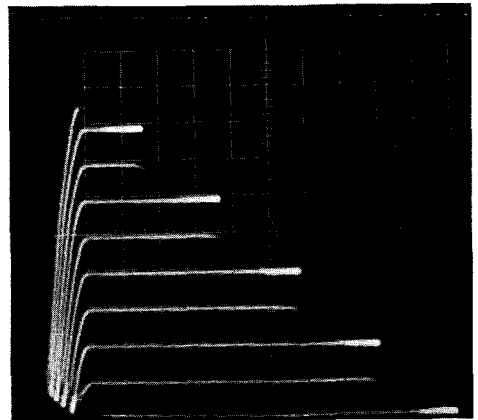


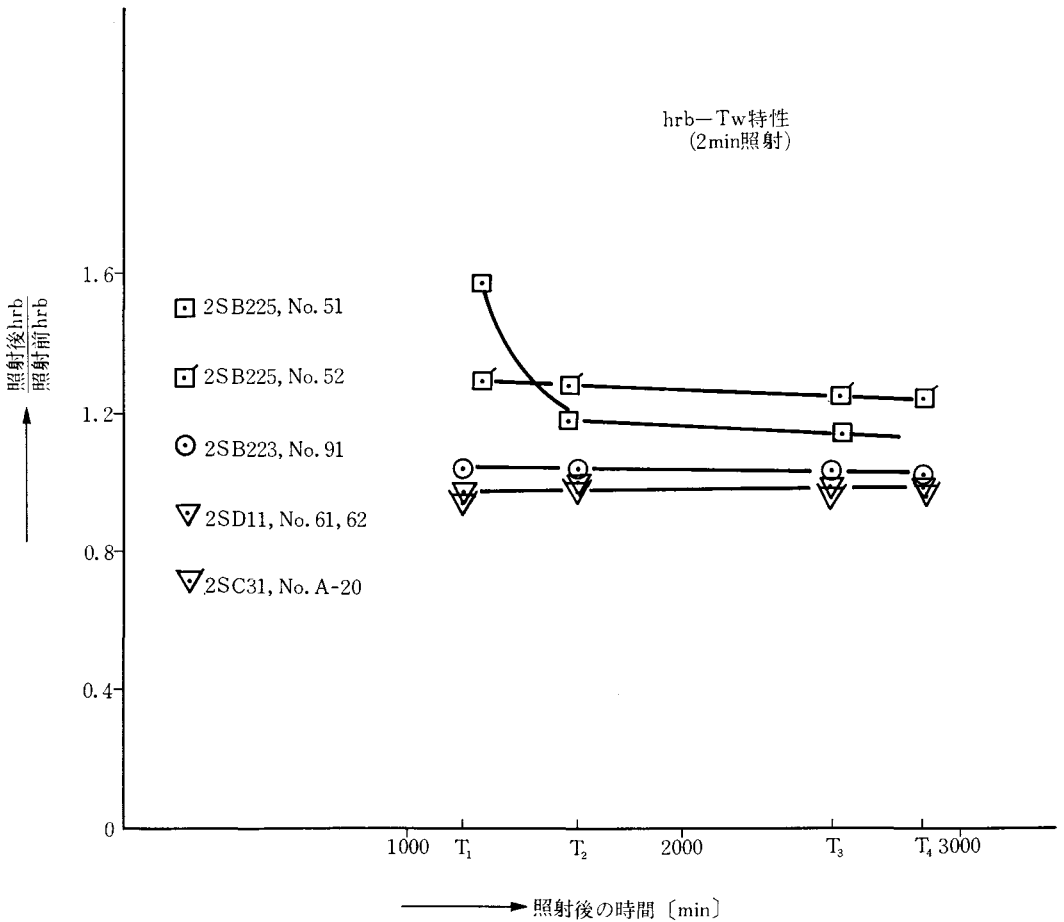
写真11 照射後 (2SD11)
 HOR. 1V/div
 VER. 5mA/div
 Step. $I_E = 5\text{mA}$

次に第3図は、上記の各種トランジスタの照射後における経過時間に対するベース接地の場合の帰還率 h_{rb} の変化を示したもので、第4図は、エミッタ接地

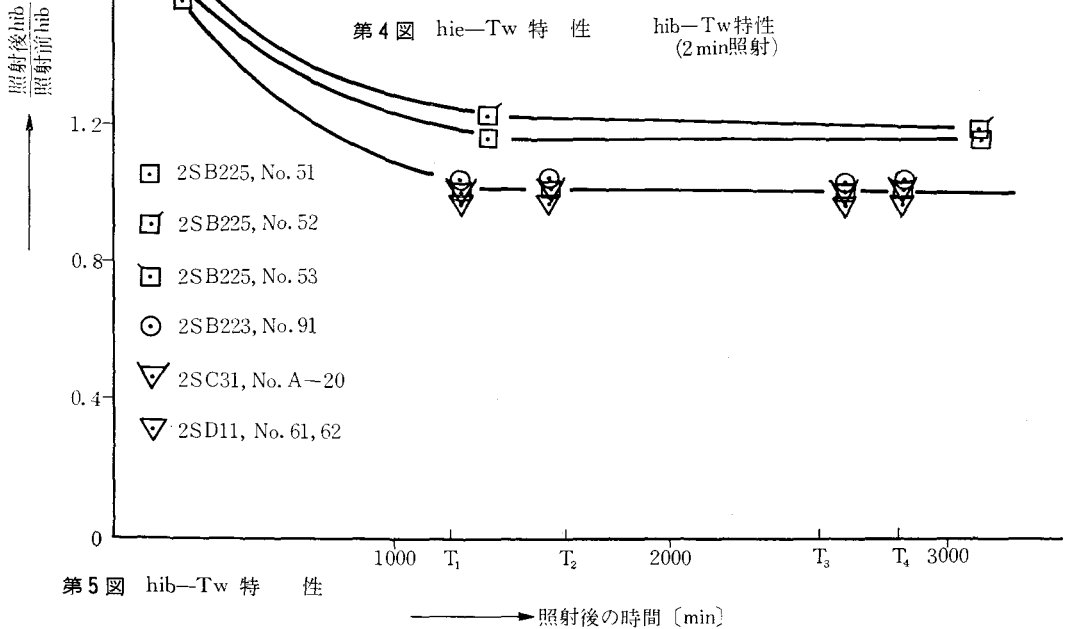
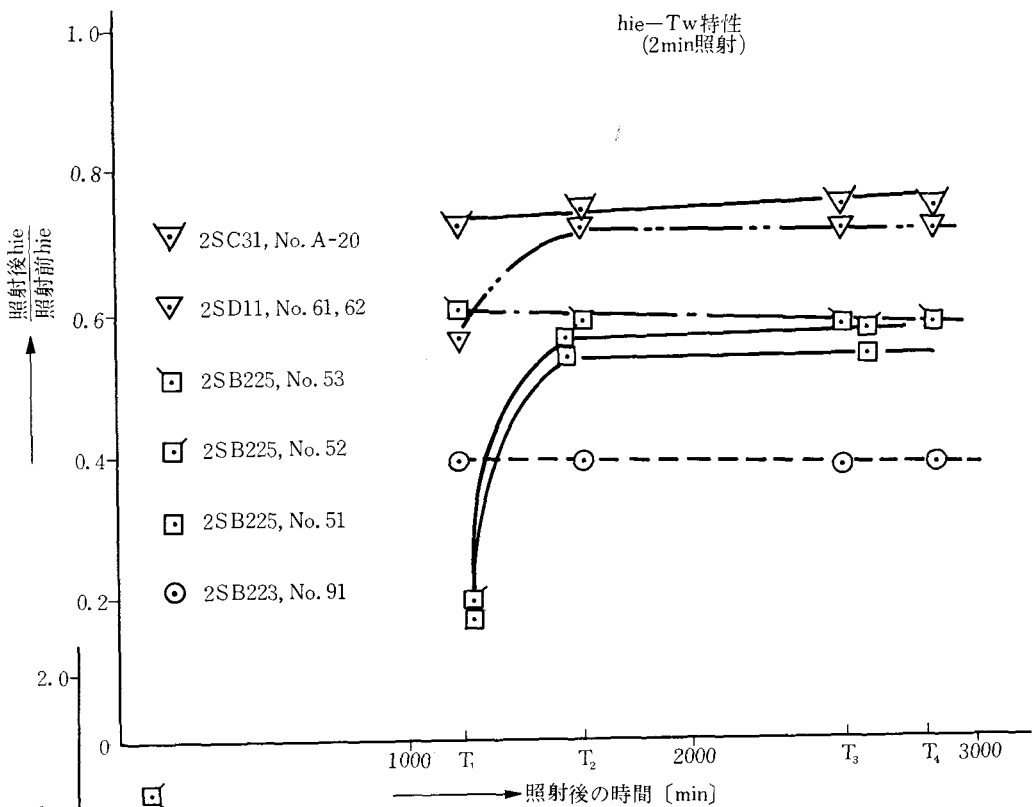
の入力インピーダンス h_{ie} の変化を示す。第5図はベース接地の入力インピーダンス h_{ib} の変化を示す。

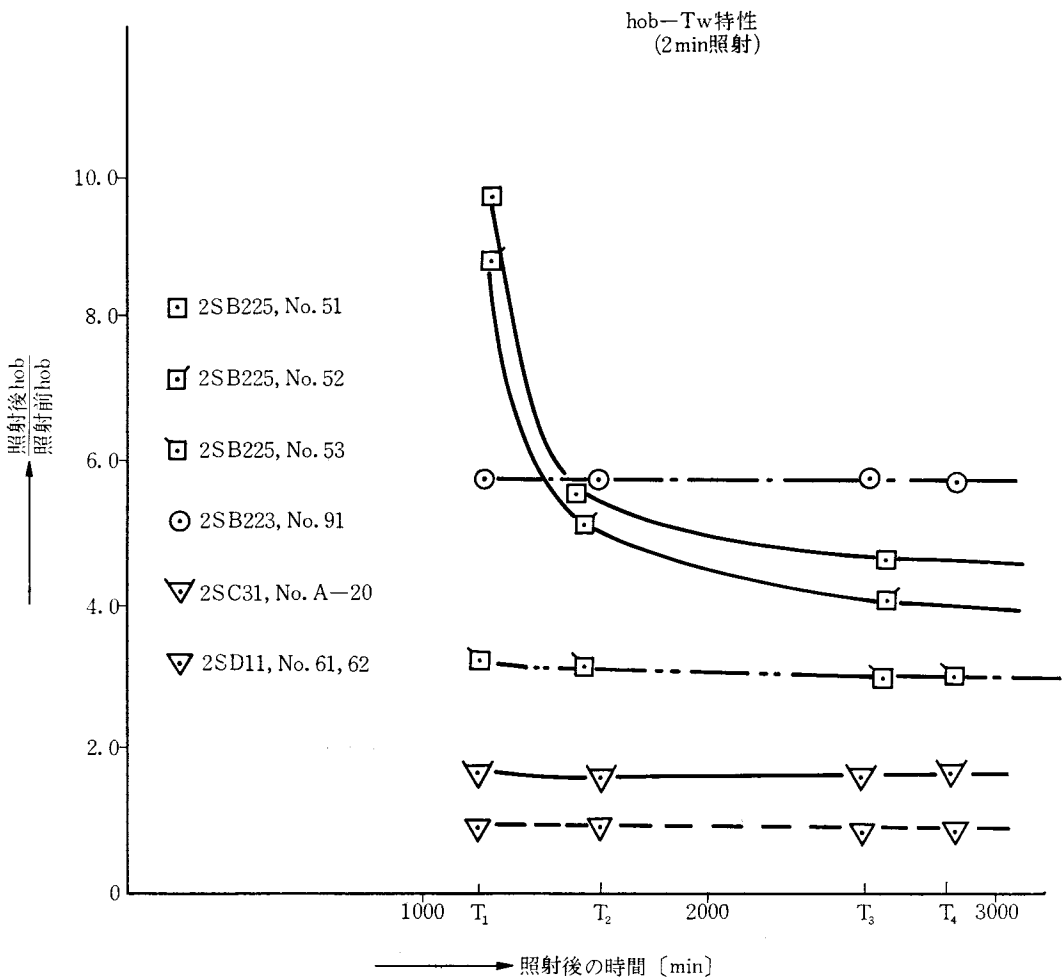
第6図は、ベース接地の出力アドミタンス h_{ob} の変化を示したもので、写真12、写真13はトランジスタの基板となる Si 単結晶のP型 (110~130 Ω -cm),

N型 (27~50 Ω -cm) について、それぞれ、照射前、2分間照射、15分照射した後、ライフタイムをメモリスコープ上の波形から測定したものである。第7図は、各種トランジスタのコレクタ遮断電流 I_{CBO} を測定したものである。



第3図 hrb-Tw 特性





第 6 図 hob-Tw 特 性

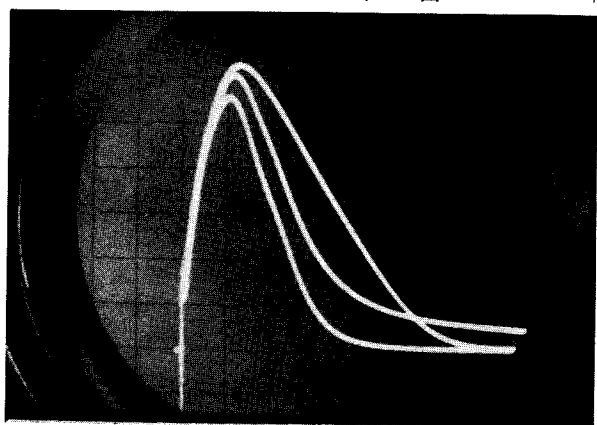
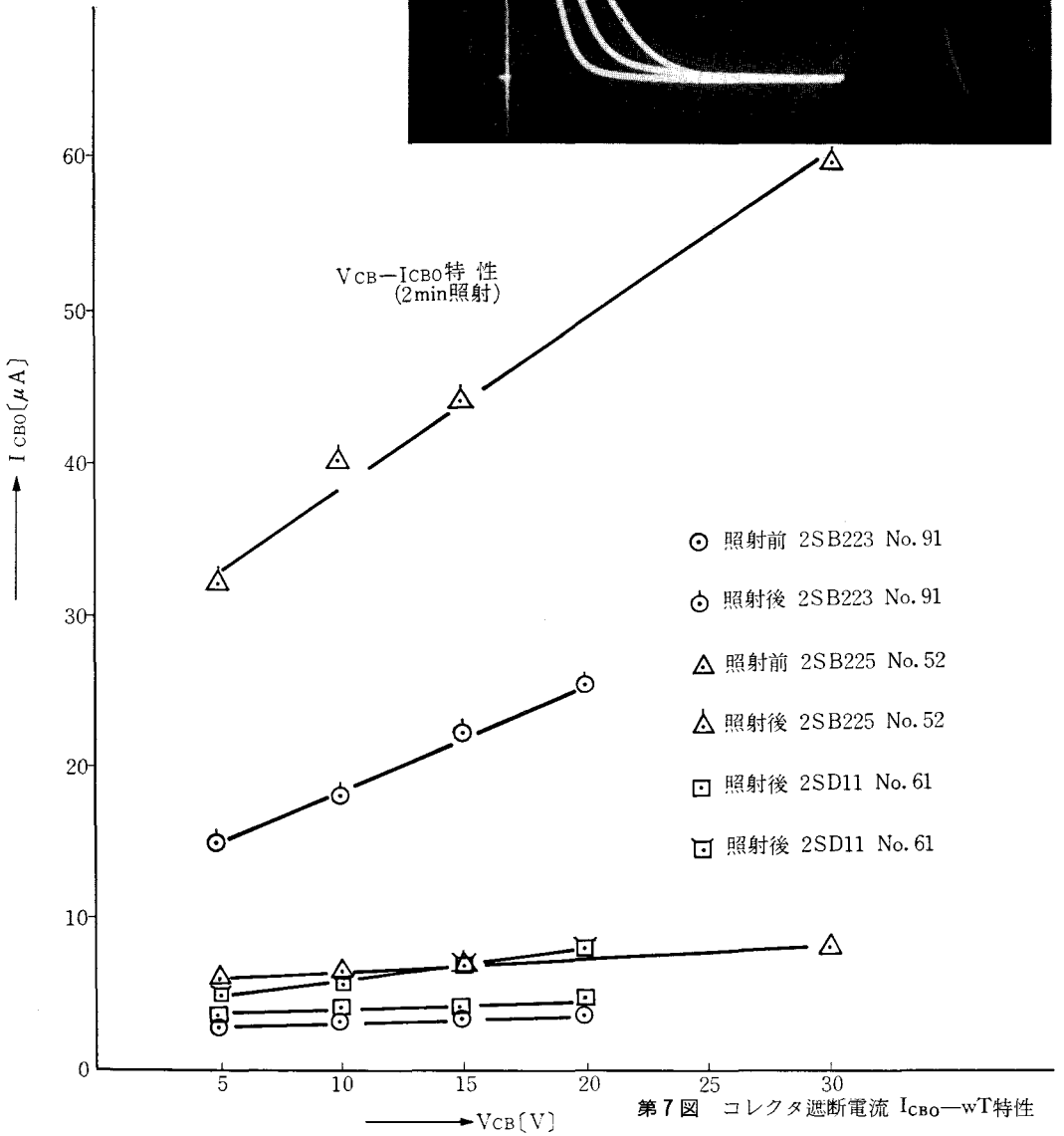
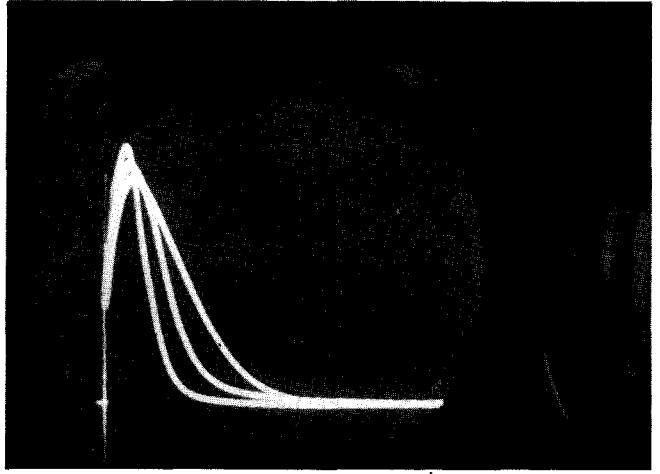


写真12 P 型
SWEEP. 10 μ s/div

写真13 N 型
SWEEP. 20 μ s/div



IV. 実験結果の検討

以上の結果から次のようなことが言える。

まず、2分照射において、回路設計上、最も重要な要素である hfe の変化について、第2図および照射前と照射後の写真からわかるように、低周波用のトランジスタの方が損傷度が大きい。これについて、電流増幅率に関する従来の理論的解析を前報⁸⁾⁹⁾で紹介した中で高周波用のトランジスタは、低周波用に比べてベース幅が狭い。従ってその影響は少ないと言える。さらに照射後の経過時間に対する変化は、約40時間以上ではほとんどみとめられず、永久的な損傷となっていることがわかる。一般に照射後の過渡的な変化については表面効果によるものと考えられているが、これらの結果から言えることは、照射後、数時間内に過渡的な変化がおこるものと予想される。この永久的な損傷は、Ge あるいは Si の結晶内に Frenkel defect が生じ、その欠陥が minority carrier の trap-level として働き、その結果 minority carrier のライフタイムを減少させ、永久的な損傷となっている。

写真1と写真2とを比較してみると hfe は著しく低下していることがわかる。従って 2SB223 については実用上問題である。

写真3、写真4によると、2SB223 ほど変化してないが、かなり特性は劣下している。写真5によると、コレクタ遮断電流は照射前に比べて著しく増大していることがわかる。これらの結果から、スイッチング用の方がコレクタ遮断電流は大きいことがわかる。

写真1～写真9まで比較してみると上に述べたように高周用の方が耐損傷性がある。

写真10、写真11によるとベース-エミッタ間の電位 V_{BE} の変化が著しいことがわかる。このことは他の試料に比べて、その変化は大きく、スイッチング素子として使用する場合回路特性に大きな支障をもたらすので充分考慮する必要がある。

次に第3図によると、ベース接地入力開放電圧帰還率 hrb は 2SB225、2SD11 を除いてはほとんど変化しないことがわかる。2SB225、2SD11 について変化が著しいのは、低周波スイッチング用として、蓄積効果を少なくしているために、hrb に大きな変化をもたらしたものである。

第4図において、エミッタ接地入力インピーダンス

は、照射前に比べて40%～70%減少している。しかも、高周波用トランジスタは低周波用に比べてその変化は少なくなっている。減少程度もほとんど hfe の変化と同じ傾向を示す。これは bulk 領域、depletion 領域内における minority carrier のライフタイムの減少に起因するものと思われる。

第5図では、ベース接地の入力インピーダンスの変化は、ほとんど少ない。これはエミッターベース間の depletion 領域内の損傷度が少ないものと思える。しかし、この入力インピーダンスの微少の変化は、エミッタ接地入力インピーダンスを大きく変化させている。

次に第6図において、ベース接地の出力アドミタンスの変化は増加の傾向を示し、特に低周波用のトランジスタよりも高周波用のトランジスタの方がその変化は著しい。このことはベース-エミッタ間の depletion 領域内の変化とベース幅内でのライフタイムの影響によるものと思われる。

次にトランジスタの基板となる Si 単結晶について、放射線束が増す程、ライフタイムは減少している。これは結晶内に minority carrier の trap level が生じ、carrier の再結合中心として働くためにライフタイムが短くなるためである。従って、トランジスタの基板として種々のものが用いられるが素子の選択にあたっては比抵抗等による基板の種類についても考慮しなければならない。

V. あとがき

以上のことから、一般に高周波用の方が低周波用に比べて、放射線(熱中性子、速中性子、 γ 線)照射による損傷度合は少ないことがわかったが、個々のパラメータについての理論的解析と実験方法および試料の選択等については十分検討する必要がある。さらに永久的な損傷だけでなく、表面効果を考慮し、照射中の影響については十分検討する必要がある。またスイッチング用トランジスタは、一般に金拡散を行なって、蓄積効果を少なくし、Recombination と Generation Center をあらかじめ作り込みしてあるので、影響は少ないと言われているので、この点についても検討する必要がある。

さらに、トランジスタの基板となる Si, Ge の単結

晶の照射効果について、比抵抗、ライフタイムの面からも考える必要がある。

また、放射線の種類、線量、エネルギー等の照射中における状態を十分考慮して行わなければならない。トランジスタ自体、同種のものでもバラツキが著しいので、試料の選択についても今後検討する予定である。

最後に本報を書き終るにあたり、照射に御協力いただいた京都大学原子炉実験所岩田志郎助教授、ならびに、尾土平徹、若宮勝征両君、また実験を手伝っていただいた研究室の学生諸君に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) J. J. Loferski, J. Appl. Phys. Vol. 29, 1958.
- 2) J. J. Loferski and P. Rappaport, Phys. Rev. Vol. 30, 1959.
- 3) H. Fritzsche and K. Lark-Horvitz, Phys. Rev. Vol. 113, 1959.
- 4) D. K. Wilson and H. S. Lee, IEEE Transactions on Nuclear Science, Ns-10, 1967.
- 5) R. J. Mattauch and R. W. Lade, IEEE Transactions on Nuclear Science, Ns-14, No. 4 1967.
- 6) L. D. Philipp and P. O. Lauritzen, IEEE Transactions on Nuclear Science, Ns-14, No. 6 1967.
- 7) NEC半導体事業部グループ；半導体部品の放射線損傷, 1967
- 8) 北山正文, 川畑敬志, 広島工業大学研究紀要, 第2巻, 1967
- 9) 北山正文, 川畑敬志, 広島工業大学研究紀要, 第3巻, 1968