JAERI-M
89-207

トランジスタのγ線及び電子線照射効果
—線量率及び照射温度の効果—

１９８９年１２月

平尾　敏雄・吉川　正人・森田　洋右
貝賀　秀明*・矢田　正信*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは，日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは，日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319－11茨城県那珂郡東海村）あて，お申しこしください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, **1989**

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　日立高速印刷株式会社

トランジスタのγ線及び電子線照射効果
－線量率及び照射温度の効果－

日本原子力研究所高崎研究所開発部
平尾　敏雄・吉川　正人・森田　洋右
貝賀　秀明*・矢田　正信*

（1989年11月13日受理）

人工衛星や原子炉周辺の放射線環境下で使用される半導体素子の耐放射線性の評価に資するため，代表的半導体素子について，放射線照射がその増幅率，漏れ電流及びスイッチング時間などの電気特性に及ぼす影響を調べた。用いた半導体素子は高耐圧低速度スイッチングの通信工業用ＰＮＰバイポーラトランジスタ（２ＳＢ603），高速度スイッチングの高周波増幅用ＮＰＮバイポーラトランジスタ（２ＳＣ764）及びＮチャンネルパワーＭＯＳトランジスタ（２ＳＫ458）である。照射は^{60}Coγ線及び電子線により，線量率を10^2～10^5Ｒ／ｈ，照射時の温度を－40～100℃の範囲で行った。その結果，次のことが明らかになった。

(1) ２ＳＢ603：直流増幅率及び漏れ電流は低線量率の方が変化が大きく，顕著な線量率依存性が認められ，直流増幅率の変化は主にベース電流の増加に起因する。逆方向飽和電流及び飽和電圧も線量率依存性を示すが，スイッチング時間には認められない。

(2) ２ＳＣ764：電気特性の照射効果に対する線量率依存性及び温度依存性は認められず，また，耐放射線性は２ＳＢ603に比べて２桁以上高い。

(3) ２ＳＫ458：電気特性の照射効果に対する線量率依存性及び温度依存性は少ない。

(4) γ線と電子線照射の比較については，２ＳＢ603は電子線の方が劣化が少なく，線量率効果と考えられる差異が観測されるが，２ＳＣ764及び２ＳＫ458についてはこれらの差は認められない。

高崎研究所：〒370－12　群馬県高崎市綿貫町1233
＊日本電気株式会社スペース・レーザ通信事業部

Irradiation Effect of Transistor by Co-60 Gamma rays and Electron Beams -Effects of Exposure Rate and Temperature-

Toshio HIRAO, Masahito YOSHIKAWA, Yosuke MORITA
Hideaki KAIGA* and Masanobu YATA*

Department of Development
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received November 13, 1989)

In order to evaluate radiation resistance of semiconductor devices which are used in radiation environments of artificial satellites and nuclear power plants, effects of radiation on the DC gain, leak current and switching time of typical transistor devices were investigated. Tested devices are PNP bi-polar transistor(2SB603), NPN bi-polar transistor(2SC764) and power MOS transistor(2SK458).

Irradiation were carried out by Cobalt-60 gamma rays and electron beams of 1 and 2 MeV at exposure rates ranging from 10^2 to 10^6R/h, and at temperature ranging from -40°C to 100°C. The following results were obtained.

(1) 2SB603 : Changes of the DC gain and leak current are larger in low exposure rate irradiations, and large exposure rate dependency is observed. The DC gain change is based on mainly increase of the base current. The exposure rate dependency is observed in the reverse saturation current and voltage, but in the switching time.

(2) 2SC764 : The exposure rate and temperature dependencies on irradiation effect are not clear, and the radiation resistance is over two orders higher than 2SB603 in the various properties.

---

* Space and Communications Development Division, NEC Corporation

(3) 2SK458 : The exposure rate and temperature dependencies on irradiation effect are small.

(4) Irradiation effect on 2SB603 by electron beams is smaller than that by gamma-rays, and the exposure rate effect is observed. No difference between electron beams and gamma rays is observed for 2SC764 and 2SK458.

Keywards : Irradiation Effect, Bi-polar Transistor, Power MOS Transistor
Co-60 Gamma Ray, Electron Beam, DC Current Gain, Leak Current,
Threshold Voltage, Temperature Effect

目　　次

1. 緒言 …… 1
2. トランジスタ照射試験における予備的検討 …… 2
2.1 目的 …… 2
2.2 実験 …… 2
2.2.1 試料 …… 2
2.2.2 照射及び熱処理 …… 2
2.2.3 測定 …… 2
2.3 実験結果と考察 …… 3
2.3.1 トランジスタの電気特性値の測定条件及び再現性 …… 3
2.3.2 照射後のトランジスタの電気特性の経時変化 …… 4
2.4 予備試験のまとめ …… 4
3. トランジスタの電気特性における線量率依存性 …… 25
3.1 目的 …… 25
3.2 実験 …… 25
3.2.1 試料及び前処理 …… 25
3.2.2 線源及び照射方法 …… 25
3.2.3 測定 …… 27
3.3 実験結果と考察 …… 27
3.3.1 2SB603（PNP）トランジスタのγ線照射効果 …… 27
3.3.2 2SC764（NPN）トランジスタのγ線照射効果 …… 32
3.3.3 2SK458（パワーMOS）トランジスタのγ線照射効果 …… 33
3.3.4 トランジスタの電子線とγ線の照射効果の比較 …… 35
4. トランジスタの照射効果に及ぼす温度の影響 …… 108
4.1 目的 …… 108
4.2 実験 …… 108
4.2.1 試料 …… 108
4.2.2 線源及び照射方法 …… 108
4.2.3 測定 …… 108
4.3 実験結果と考察 …… 109
4.3.1 バイポーラトランジスタの電気特性に及ぼす照射温度の影響 …… 109
4.3.2 MOSトランジスタの電気特性に及ぼす照射温度の影響 …… 110
5. 結言 …… 126
引用文献 …… 127

Contents

1. Introduction 1
2. Preliminary studies of Transistor Irradiation Test 2
2.1 Purpose 2
2.2 Experimentals 2
2.2.1 Samples 2
2.2.2 Irradiation and Heat Treatment 2
2.2.3 Measurements 2
2.3 Results and Discussion 3
2.3.1 Measurement Condition and Reproducibilty in Electrical Properties of Transistor 3
2.3.2 Changes of Electrical Properties of Transistor with elapsed time after Irradiation 4
2.4 Summaries of Preliminary studies 4
3. Dose Rate Dependence on Electrical Properties of Transistor 25
3.1 Purpose 25
3.2 Experimentals 25
3.2.1 Samples and Pre-conditioning of Samples 25
3.2.2 Irradiation Source and Method 25
3.2.3 Measurements 27
3.3 Results and Discussion 27
3.3.1 Effect of Gamma ray Irradiation on 2SB603(PNP) Transistor 27
3.3.2 Effect of Gamma ray Irradiation on 2SC764(NPN) Transistor 32
3.3.3 Effect of Gamma ray Irradiation on 2SK458(Power MOS) Transistor 33
3.3.4 Comparison of Gamma rays with Electron beams on the radiation effect of Transistor 35
4. Effect of Irradiation Temperature on Transistor 108
4.1 Purpose 108
4.2 Experimentals 108
4.2.1 Samples 108
4.2.2 Irradiation Source and Method 108
4.2.3 Measurements 108
4.3 Results and Discussion 109

4.3.1 Effect of Irradiation Temperature on Electrical Properties of Bi-polar Transistor 109
4.3.2 Effect of Irradiation Temperature on Electrical Properties of MOS Transistor 110
5. Conclusion 126
Reference 127

1. 緒　　言

原子力関係の諸施設，大型加速器，また，人工衛星などにおいて，半導体素子を利用した関連の電子機器・部品が大量に使用されるようになってきた。これらの諸施設において電子機器・部品を使用するにあたっては，放射線照射下におけるこれらの半導体素子の特性の変化を十分に把握しておく必要がある。

半導体デバイスの耐放射線性に関する研究は米国において盛んであり，例えばこれらのデバイスの耐放射線性試験法として，すでにＭＩＬ－ＳＴＤ－883Ｂ，Method 1019[1] などがある。この試験法は吸収線量と半導体デバイスの特性値の変化からその劣化を評価している。しかし，これらの放射線劣化は吸収線量ばかりでなく，線量率，照射温度，バイアス条件等に複雑に依存することが知られている[2),3),4)]。このため，使用環境に応じた半導体デバイスの照射劣化を明らかにするとともに，照射劣化の原因を解明することが必要と考えられる。

半導体デバイスの耐放射線性に関する研究方法として，デバイスとしての基本的な特性を備えているが非常に単純化した構造のモデル試料を作製しその放射線照射効果を調べる方法と，実際に使用されている半導体デバイスを照射して試験する方法がある。前者は半導体デバイスの照射による変化の挙動とその原因を単純化して知るのにきわめて有力であるが，モデル試料と実際に使用されている半導体デバイスにおける製造上及び構造上などの種々の違いから生じると思われる幾つかの相違を見のがす可能性がある。後者は非常に数多くある半導体デバイスの単なる結果を与えるにすぎないのかも知れないが，得られた結果の中から新たな現象を見いだして今後のより基礎的な研究課題とすることもできる。

本報では，これらのことを考慮して，実際に使用されている素子ではあるが，なるべく構造の簡単な素子について放射線の照射効果を研究した。一方，原子力関係の施設や人工衛星等で半導体素子に実際に照射される線量率は一般に10 ～10^2R／hであり[5)]，通常の試験や実験条件である10^4～10^6R／hに比べて非常に低い。このような低い線量率ではアニール効果のため同一照射線量で比較すると高線量率照射に比べて半導体デバイスの劣化が少ないと考えられる。このことは，試験や実験条件にくらべて上記の実使用条件の方が半導体デバイスの寿命が長くなることを意味しており，実用上きわめて有用である。

本研究では，トランジスタの照射劣化における線量率効果の詳細な検討を主目的として，バイポーラトランジスタ，ＭＯＳトランジスタから３種類を選び，^{60}Co－γ線照射による増幅率，もれ電流などの諸特性の線量率依存性を調べた。線量率は10^2R／h～10^6R／h までの広い範囲にわたって変化させた。線量率依存性の他に，照射時の温度依存性，電子線とγ線の照射効果の比較も検討した。これらの実験により，用いたトランジスタの線量率効果，照射時温度効果などを明らかにすることができた。

なお，本研究は昭和61年７月１日から昭和62年３月31日の期間において，日本原子力研究所，高崎研究所と日本電気（株），スペース・レーザ通信開発本部との共同研究として行なわれたものである。

2. トランジスタ照射試験における予備的検討

2.1 目　的

トランジスタの照射効果の実験を始めるにあたって，照射トランジスタの特性の測定の再現性などに関して予備的検討を行った。まず，原研とＮＥＣの間でトランジスタの特性について同一の測定を行って，同一の測定結果が得られるかどうか，また，原研で照射後測定した試料をＮＥＣに送付した場合，アニール等による大幅な特性変化のないことなどを実験的に確認しておく必要がある。

本章では，照射試験を行う前の予備的検討として線量率効果等の試験に用いるのと同一種類のトランジスタを用いて，①測定値の再現性，②照射トランジスタの特性測定条件，③照射前処理としての熱処理効果，④照射後の電気特性の経時変化について検討を行った。

2.2 実　験

2.2.1 試料

バイポーラトランジスタとして，２ＳＢ603（ＰＮＰ），２ＳＣ764（ＮＰＮ）及びパワーＭＯＳトランジスタとして２ＳＫ458（以上いずれもＮＥＣ製）各10ケを用いた。これらは後述する線量率効果及び照射温度効果の実験に用いるトランジスタと同一種のものであり，各トランジスタの特性の詳細は第３章に記述する。

2.2.2 照射及び熱処理

トランジスタの照射は，日本原子力研究所高崎研究所 Co ２棟第５照射室にて，２ＳＢ603，２ＳＣ764は1×10^5R／hで3×10^5R及び1×10^6R／hで1×10^6R，２ＳＫ458は3×10^4R／hで3×10^4R及び1×10^6R／hで1×10^5R照射した。各トランジスタの電気特性の経時変化の測定は，照射時にバイアス有及び無，照射後の保存時にバイアス有及び無の組み合せからなる３条件について行った。また，トランジスタの初期特性を安定させるための前処理として，100°C，３時間の熱処理を検討した。

2.2.3 測定

測定は半導体直流パラメータ解析装置（ＹＨＰ4145Ａ）にパーソナルコンピュータ（ＹＨＰ216）を組み合わせたシステムを用い，温度23°C，湿度55％の恒温恒湿室で行った。トランジスタ測定装置系の概要をFig.2.1に，装置系の仕様をTable 2.1に示す。各トランジスタの測定項目については後述する。

2.3 実験結果と考察

2.3.1 トランジスタの電気特性値の測定条件及び再現性

原研とＮＥＣにおけるトランジスタの電気特性測定値の再現性をみるために，未照射の２ＳＢ603（ＰＮＰバイポーラトランジスタ），２ＳＣ764（ＮＰＮバイポーラトランジスタ）及び２ＳＫ458（ＭＯＳトランジスタ）の各10ケの同一試料を用いて，Table 2.2に示す測定条件にて両者で特性測定を行い結果を比較した。

２ＳＢ603では逆方向飽和電流I_{CBO}，I_{EBO}について，Table 2.3に示すように両者の測定値に若干の相違が認められただけであったが，２ＳＫ458では，Table 2.4に示すようにドレインしゃ断電流I_{DSS}，ゲート漏れ電流I_{GSS}に差がみられ，試料によっては，50～100倍の差があるものもあった。バイポーラあるいはＭＯＳトランジスタのいずれの測定においても，差違の現れた測定結果はｐＡ単位のごく微弱な電流に関するものであり，20～30％程度の差は容認される。

しかし，２ＳＫ458については差違が大きいことから測定方法について以下の点について検討を行った。すなわち，①同一装置による測定者の違い，②測定装置のテストフィクチャー端子へのトランジスタの接続方法，③同一装置，同一試料についての繰り返し測定値の再現性を検討した。その結果，①の測定者による違いはなかった。②のテストフィクチャー端子へのトランジスタの接続方法による測定値の違いはTable 2.5に示すように，接続端子の違いによりI_{GSS}の測定値がかなり異なっており，同一装置においても端子への接続は同一にして測定すべきことが分かった，③の再現性については，Table 2.6に同一試料の繰り返し測定結果を示すように，２ＳＫ458のI_{DSS}及びI_{GSS}は試料を測定器に接続後，同一測定を２～４回繰り返す間に顕著に変化し，その後５～10回目ではほぼ測定が一定となった。なお，原研とＮＥＣの測定で，違いが見られない試料や測定パラメータについては，測定の繰り返しによる変動はきわめて少なかった。

以上のことから，原研とＮＥＣとでの同一試料による測定値の違いは，測定器への接続方法を一定にすれば，試料そのものが測定を繰り返すことなどにより測定値がバラつくことが大きな原因であることが分かった。

上記の検討結果から，トランジスタの測定条件を再検討した。Fig.2.2のｉ－ａ），ii－ａ）に今までの測定条件（Table 2.2）で行っていた測定点４～５点を，Fig.2.2のｉ－ｂ），ii－ｂ）に測定点を41～100点に増やし，さらに測定範囲を拡大（Table 3.6）して測定した結果を比較して示す。このように，測定パラメータのステップを小さくして（あるいは測定時の保持時間を長くする）測定時間をかけ，かつ，特性測定範囲を広げて測定することによって，測定値の再現性が得られることが分かった。このようにして定めた測定条件を第３章のTable 3.6に示す。第３章以下の各トランジスタの特性値の測定はすべてこの再現性の良い条件で行った。

一方，後述する線量率効果等の照射試験に用いたトランジスタ試料は，各々について同一のウエハから製造されたものを用いた。また，照射前に熱処理を行いリーク電流を少なくするなど電気特性の安定化をはかった。熱処理（100℃，3h）を行った場合の結果をFig.2.3及びFig.

2.4に照射した結果とあわせて示す。熱処理によりトランジスタの逆方向飽和電流（I_{CBO}），ドレイン漏れ電流（I_{DSS}）が低下するものもあり，しかもこの低下量が照射試料と同程度の場合もあった。このことからトランジスタの電気特性の安定化のために，トランジスタの許容最高温度で照射前に熱処理することにした。

2.3.2 照射後のトランジスタの電気特性の経時変化

本研究を行うにあたり，照射試料の輸送期間（原研－ＮＥＣ間）による特性の変化（主に回復）を調べておく必要がある。期間は１週間程度とし，バイポーラトランジスタは3×10^5R及び1×10^6R，ＭＯＳトランジスタは3×10^4R照射した試料の室温（22℃ ± 0.5℃)における回復効果を調べた。

この結果を主にI_{CBO}についてFig. 2.5 ～Fig. 2.8に，h_{FE}及びしきい値電圧V_{th}についてはFig.2.9及びFig. 2.10に示す。I_{CBO}について，照射後25時間程度まで若干の回復現象が認められるが，その後の変化はきわめて少ない。また，h_{FE}及びV_{th}では，照射直後からほとんど変化が認められない。これらのことから，実際の輸送期間である２～３日間では，特性の回復はきわめて小さな値であることが分かった。

2.4 予備試験のまとめ

バイポーラトランジスタ（２ＳＢ603，２ＳＣ764），ＭＯＳトランジスタ（２ＳＫ458）の^{60}Coγ線照射効果の実験を行うために，トランジスタ特性測定値の再現性，輸送期間を含むトランジスタの照射後の電気特性の経時変化について予備的検討を行った。その結果，測定の再現性については測定装置のテストフィクチャー端子と測定するトランジスタの接続法を一定とし，さらにトランジスタになるべく急激な電圧や電流がかからないように測定パラメータのステップを小さくし，時間をかけて測定することにより再現性が得られること，また，照射後の特性の経時変化は一週間程度ではきわめて小さな値であることなどが明らかとなった。

Table 2.1 Specification of the Measurement System

Semiconductor Parameter Analyzer (Model 4145 A)

Stimulus/Measurement unit (SMU): Four SMU channels,
variable or constant DC voltage source/current monitor
variable or constant DC current source/voltage monitor

Current range : 1 pA ~ 100 mA

Voltage range : 100 μV ~ 100 V

Measurement resolution : voltage,4·1/2 digits(1 mV max.)
current,4 digits(50 fA max.)

Interface : GP-IB.

Porsonal Computer (Model 216)

Processer : MC 68000(8 MHz, Motorola)

Memory : 2.4 Mbyte

Interface : GP-IB, RS-232C

Flexible Disk Drive (Model 9122 D)

Capacity : 630 Kbyte(3·1/2 inch disk)

Hard Disk Drive (Model 9134 D)

Capacity : 14.8 Mbyte(5·1/4 inch disk)

Table 2.2 Parametric Conditions of Semiconductor Analyzer (4145A)

(a) 2SB603

Condition / Parameter	Source			Sweep range			
	Channel[*1]	MODE[*2]	FUNC.[*3]	START	STOP	STEP	INTEG TIME
ICBO	1−C	V	VAR1	−10V	−100V	−10V	Long
	2	−	−	−	−	−	
	3−B	COM	CONST	−	−	−	
IEBO	1−E	V	VAR1	−0.5V	−5V	−0.5V	Long
	2	−	−	−	−	−	
	3−B	COM	CONST	−	−	−	
hFE	1−E	COM	CONST	−	−	−	short
	2−B	I	VAR1	−100μA	−700μA	−100μA	
	3−C	V	CONST (−5V)	−	−	−	
VCE (sat)	1−E	COM	CONST	−	−	−	short
	2−B	I	Var1' (0.03V)	−	−	−	
	3−C	I	Var1	−10mA	−100mA	−10mA	
VBE (sat)	1−E	COM	CONST	−	−	−	short
	2−B	I	Var1' (0.03V)	−	−	−	
	3−C	I	Var1	−10mA	−100mA	−10mA	

(b) 2SC764

Condition / Parameter	Source			Sweep range			
	Channel[*1]	MODE[*2]	FUNC.[*3]	START	STOP	STEP	INTEG TIME
ICBO	1−C	V	VAR1	5V	40V	5V	Long
	2	−	−	−	−	−	
	3−B	COM	CONST	−	−	−	
IEBO	1−E	V	VAR1	1V	4V	0.5V	Long
	2	−	−	−	−	−	
	3−B	COM	CONST	−	−	−	
hFE	1−E	COM	CONST	−	−	−	short
	2−B	I	VAR1	20μA	200μA	LOG10	
	3−C	V	CONST (1.0V)	−	−	−	
VCE (sat)	1−E	COM	CONST	−	−	−	short
	2−B	I	Var1' (0.1V)	−	−	−	
	3−C	I	Var1	5mA	50mA	5mA	
VBE (sat)	1−E	COM	CONST	−	−	−	short
	2−B	I	Var1' (0.1V)	−	−	−	
	3−C	I	Var1	5mA	50mA	5mA	

Table 2.2 (continued)

(c) 2SK458

Condition / Parameter	Source			Sweep range			
	Channel *1	MODE *2	FUNC. *3	START	STOP	STEP	INTEG TIME
IDSS	1-S	COM	CONST	–	–	–	Long
	2-G	COM	CONST	–	–	–	
	3-D	V	Var1	10V	100V	10V	
IGSS	1-S	COM	CONST	–	–	–	Long
	2-D	COM	CONST	–	–	–	
	3-G	V	Var1	−20V	20V	5V	
VGS (off)	1-S	COM	CONST	–	–	–	short
	2-D	V	CONST (10V)	–	–	–	
	3-G	V	Var1	2V	4.5V	0.2V	
RDS (on)	1-S	COM	CONST	–	–	–	short
	2-D	I	Var1	40mA	60mA	5mA	
	3-G	V	CONST (10V)	–	–	–	

*1) channel number
Bi-polar transistor : C; Collector, B; Base, E; Emitter
Mos transistor : S; Source , G; Gate, D; Drain
ex.
1-C ; Collector connect with No.1 channel
2-G ; Gate connect with No.2 channel

*2) V ; Voltage source / current monitor
I ; Current source / voltage monitor
COM ; Voltage source = 0 V, compliance = 105 mA

*3) VAR1 ; main sweep parameter
VAR1´ ; synchronous sweep parameter
CONST ; constant source

Table 2.3 Comparison of Bi-polar Transistor (2SB603) Parameter Measured by JAERI and NEC* (Both used HP 4145A)

i) Reverse Current (ICBO, IEBO)

(a) 2SB603 No. 3 Sample

	ICBO (pA)		
VCB (V)	JAERI	NEC	NEC/JAERI
-10.000	-101.3	-81.50	0.805
-20.000	-146.0	-104.4	0.715
-30.000	-183.5	-132.7	0.723
-40.000	-255.3	-193.9	0.759
-50.000	-414.1	-335.4	0.810
-60.000	-458.1	-371.8	0.812
-70.000	-485.4	-392.7	0.809
-80.000	-506.2	-408.0	0.806
-90.000	-521.8	-420.1	0.805
-100.00	-537.5	-430.4	0.800

(b) 2SB603 No. 4 Sample

	ICBO (nA)		
VCB (V)	JAERI	NEC	NEC/JAERI
-10.000	-7.298	-7.293	0.999
-20.000	-7.475	-7.440	0.995
-30.000	-7.703	-7.638	0.992
-40.000	-7.963	-7.876	0.989
-50.000	-8.083	-7.967	0.986
-60.000	-8.180	-8.039	0.983
-70.000	-8.281	-8.114	0.980
-80.000	-8.379	-8.183	0.977
-90.000	-8.704	-8.480	0.974
-100.00	-9.354	-9.103	0.973

(c) 2SB603 No. 9 Sample

	IEBO (pA)		
VEB (V)	JAERI	NEC	NEC/JAERI
-0.5000	-2.700	-3.950	1.463
-1.0000	-3.750	-5.400	1.440
-1.5000	-4.400	-6.400	1.455
-2.0000	-5.050	-7.100	1.406
-2.5000	-5.650	-8.100	1.434
-3.0000	-6.200	-8.650	1.395
-3.5000	-6.650	-9.400	1.414
-4.0000	-7.250	-10.10	1.393
-4.5000	-7.800	-10.90	1.397
-5.0000	-8.350	-11.55	1.383

(d) 2SB603 No. 10 Sample

	IEBO (pA)		
VEB (V)	JAERI	NEC	NEC/JAERI
-0.5000	-2.350	-2.850	1.213
-1.0000	-3.250	-4.100	1.262
-1.5000	-3.950	-4.850	1.228
-2.0000	-4.600	-5.550	1.207
-2.5000	-5.100	-6.100	1.196
-3.0000	-5.650	-6.700	1.186
-3.5000	-6.150	-7.200	1.171
-4.0000	-6.700	-7.900	1.179
-4.5000	-7.200	-8.500	1.181
-5.0000	-7.800	-9.050	1.160

*) JAERI: Japan Atomic Energy Research Institute
NEC : Nippon Electric Corporation

Table 2.4 Comparison of MOS Transistor (2SK458) Parameter Measured by JAERI and NEC* (Both used HP 4145A)

i) Drain Cut-off Current (IDSS)

(a) 2SK458 No.3 Sample

	IDSS (pA)		
VDS (V)	JAERI	NEC	NEC/JAERI
10.000	61.50	1765.0	28.699
20.000	95.80	3800.0	39.666
30.000	125.7	5938.0	47.239
40.000	156.2	8180.0	52.369
50.000	192.3	10540.0	54.810
60.000	231.3	12950.0	55.988
70.000	276.6	15460.0	55.893
80.000	332.7	18100.0	54.403
90.000	402.3	20870.0	51.877
100.00	491.5	23780.0	48.383

(b) 2SK458 No.4 Sample

	IDSS (pA)		
VDS (V)	JAERI	NEC	NEC/JAERI
10.000	33.20	20.50	0.617
20.000	48.05	25.75	0.536
30.000	56.55	29.45	0.521
40.000	62.50	32.35	0.518
50.000	71.20	35.75	0.502
60.000	76.75	38.35	0.499
70.000	82.45	41.15	0.499
80.000	88.40	43.75	0.495
90.000	94.55	46.70	0.494
100.00	100.90	50.05	0.496

ii) Gate Leakage Current (IGSS)

(a) 2SK458 No.3 Sample

	IGSS (pA)		
VGS (V)	JAERI	NEC	NEC/JAERI
-20.00	-35.30	-3456.0	97.903
-15.00	-24.45	-2496.0	102.086
-10.00	-15.75	-1563.0	99.238
-5.00	-6.850	-669.6	97.752
0.000	1.600	168.3	105.188
5.000	10.150	961.7	94.749
10.000	19.150	1780.0	92.950
15.000	27.850	2649.0	95.117
20.000	37.150	3568.0	96.043

(b) 2SK458 No.4 Sample

	IGSS (pA)		
VGS (V)	JAERI	NEC	NEC/JAERI
-20.00	-5.300	-4.250	0.802
-15.00	-1.350	-1.300	0.963
-10.00	0.000	0.150	0.963
-5.00	1.100	0.900	0.818
0.00	1.900	1.600	0.842
5.00	2.350	2.050	0.872
10.00	2.950	2.250	0.763
15.00	3.450	2.950	0.855
20.00	4.000	3.100	0.775

*) JAERI: Japan Atomic Energy Research Institute
NEC : Nippon Electric Corporation

Table 2.5 Changes in Electrical Parameters Measured by Different Condition of MOS Transistor (2SK458, No.9) and Test Fixture of HP 4145A

i) Gate-Leakage Current (IGSS)

a) Connector number of test fixture — 2SK458

1;	No contact
2;	Source
3;	Gate
4;	Drain

VGS (V)	IDSS (pA)
-20.000	-66.55
-15.000	-47.95
-10.000	-31.40
-5.000	-15.00
0.000	1.850
5.000	18.90
10.000	36.30
15.000	54.25
20.000	72.75

b) Connector number of test fixture — 2SK458

1;	Gate
2;	Drain
3;	No contact
4;	Source

VGS (V)	IGSS (pA)
-20.00	-346.8
-15.00	-247.0
-10.00	-157.6
-5.00	-71.40
0.00	11.40
5.00	92.35
10.00	171.6
15.00	251.6
20.00	333.4

Table 2.6 Changes in Electrical Parameters Caused by Repetition of Measurement.

1) 2SB603, Sample No.2

First measurement		5th measurement	
Variable : VEB -Ch1 Linear sweep Start -0.500V Stop -5.000V Step -0.500V Constant : VDS -Ch3 .000V		Variable : VEB -Ch1 Linear sweep Start -0.500V Stop -5.000V Step -0.500V Constant : VDS -Ch3 .000V	
VEB -Ch1	IEB0 -Ch1	VEB -Ch1	IEB0 -Ch1
-0.500V	-3.500pA	-0.500V	-2.550pA
-1.000V	-4.250pA	-1.000V	-3.900pA
-1.500V	-5.000pA	-1.500V	-4.700pA
-2.000V	-5.650pA	-2.000V	-5.350pA
-2.500V	-6.350pA	-2.500V	-5.900pA
-3.000V	-6.950pA	-3.000V	-6.700pA
-3.500V	-7.650pA	-3.500V	-7.300pA
-4.000V	-8.200pA	-4.000V	-7.650pA
-4.500V	-8.800pA	-4.500V	-8.450pA
-5.000V	-9.500pA	-5.000V	-9.050pA

2) 2SK458, Sample No.1

First measurement		5th measurement	
Variable : VGS -Ch3 Linear sweep Start -20.000V Stop 20.000V Step 5.000V Constant : VS -Ch1 .000V VD -Ch2 .000V		Variable : VGS -Ch3 Linear sweep Start -20.000V Stop 20.000V Step 5.000V Constant : VS -Ch1 .000V VD -Ch2 .000V	
VGS -Ch3	IGSS -Ch3	VGS -Ch3	IGSS -Ch3
-20.00V	-2.750pA	-20.00V	-4.450pA
-15.00V	-0.500pA	-15.00V	-1.050pA
-10.00V	0.150pA	-10.00V	-0.050pA
-5.00V	0.600pA	-5.00V	0.400pA
0.00V	1.000pA	0.00V	0.900pA
5.00V	1.200pA	5.00V	1.050pA
10.00V	1.300pA	10.00V	1.300pA
15.00V	1.550pA	15.00V	1.450pA
20.00V	1.650pA	20.00V	1.650pA

3) 2SK458, Sample No.3

First measurement		5th measurement	
Variable: VGS -Ch3 Linear sweep Strat -20.000V Stop 20.000V Step 5.000V Constants: VS -Ch1 .0000V VD -Ch2 .0000V		Variable: VGS -Ch3 Linear sweep Strat -20.000V Stop 20.000V Step 5.000V Constants: VS -Ch1 .0000V VD -Ch2 .0000V	
VGS -Ch3	IGSS -Ch3	VGS -Ch3	IGSS -Ch3
-20.000V	-43.00pA	-20.000V	-39.25pA
-15.000V	-29.65pA	-15.000V	-27.25pA
-10.000V	-17.65pA	-10.000V	-17.40pA
-5.000V	-7.35pA	-5.000V	-8.00pA
0.000V	1.20pA	0.000V	1.25pA
5.000V	8.75pA	5.000V	10.60pA
10.000V	15.75pA	10.000V	19.85pA
15.000V	22.25pA	15.000V	29.20pA
20.000V	28.80pA	20.000V	38.65pA

4) 2SK458, Sample No.8

First measurement		5th measurement	
Variable: VDS -Ch3 Linear sweep Strat 10.000V Stop 100.000V Step 10.000V Constants: VS -Ch1 .0000V VD -Ch2 .0000V		Variable: VDS -Ch3 Linear sweep Strat 10.000V Stop 100.000V Step 10.000V Constants: VS -Ch1 .0000V VD -Ch2 .0000V	
VDS -Ch3	IDSS -Ch3	VDS -Ch3	IDSS -Ch3
10.000V	38.00pA	10.000V	19.10pA
20.000V	56.05pA	20.000V	49.85pA
30.000V	66.45pA	30.000V	67.25pA
40.000V	78.65pA	40.000V	83.30pA
50.000V	90.20pA	50.000V	98.20pA
60.000V	102.00pA	60.000V	113.20pA
70.000V	113.80pA	70.000V	127.80pA
80.000V	126.10pA	80.000V	143.30pA
90.000V	140.00pA	90.000V	160.10pA
100.000V	156.00pA	100.000V	178.80pA

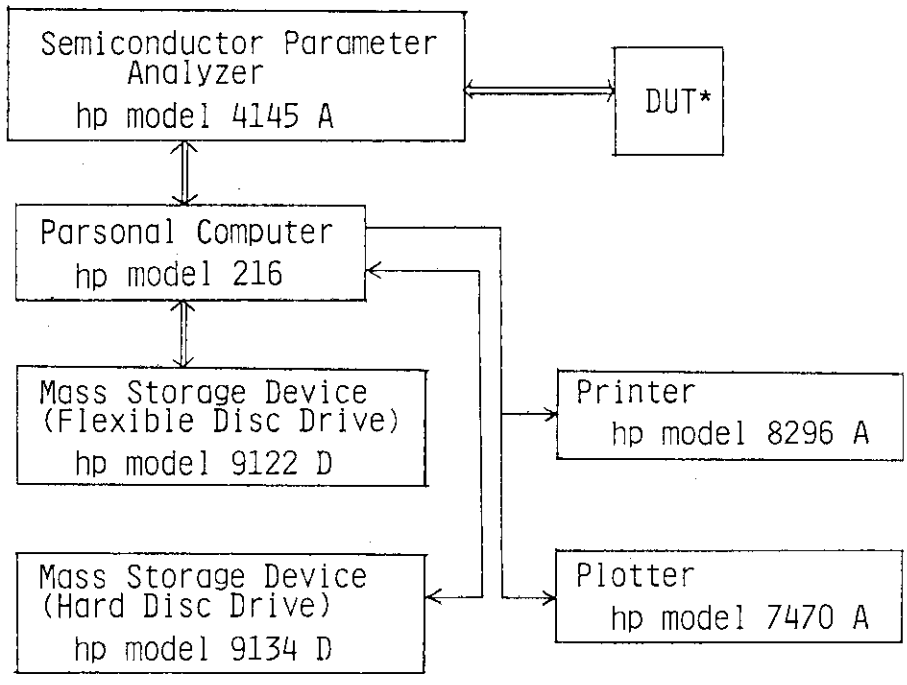
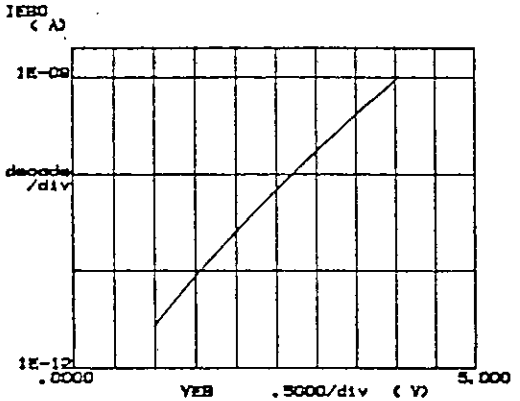
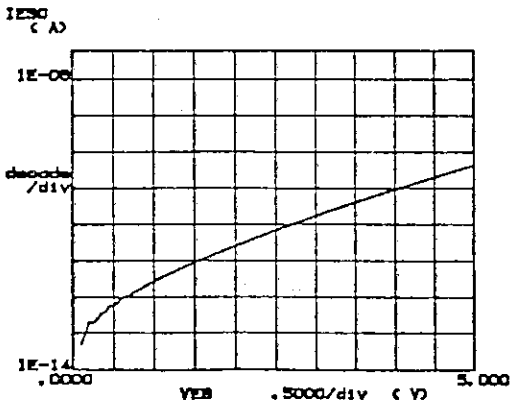


Fig. 2.1 Block Diagram of Measurement System
*DUT; Device under test

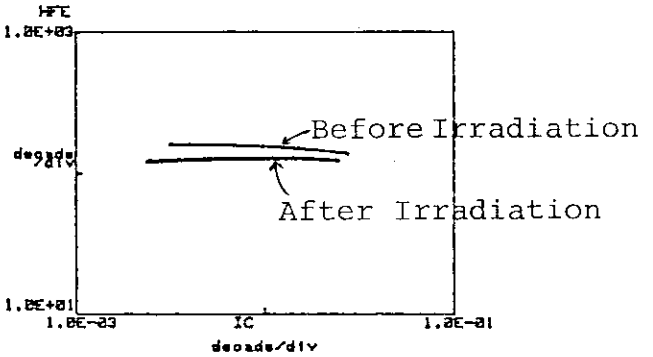


i-a) Measurement Procedure of Table 2.2

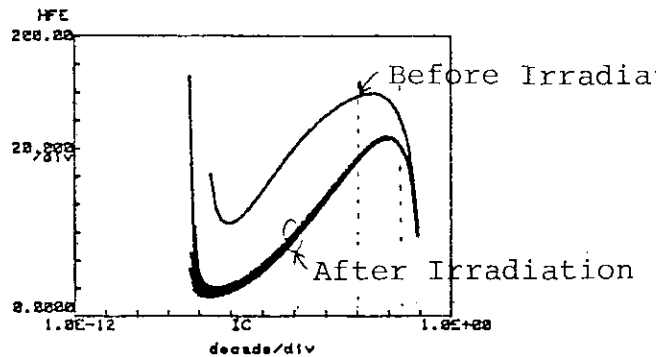


i-b) Measurement Procedure of Table 3.6

i) Relationship between V_{EB} and I_{EBO}



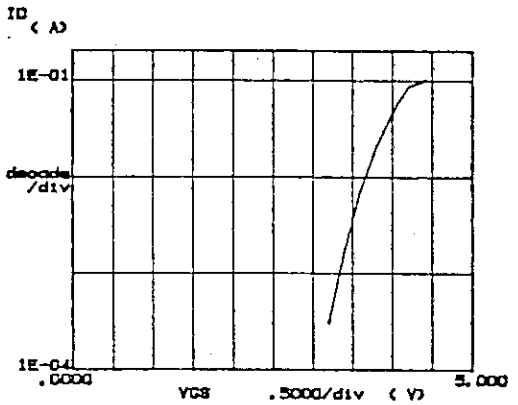
ii-a) Measurement Procedure of Table 2.2



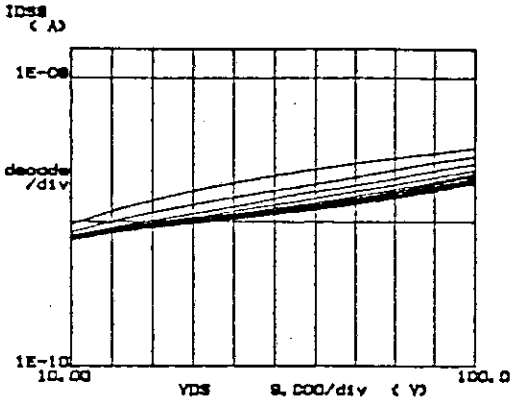
ii-b) Measurement Procedure of Table 3.6

ii) Relationship between I_C and h_{FE}

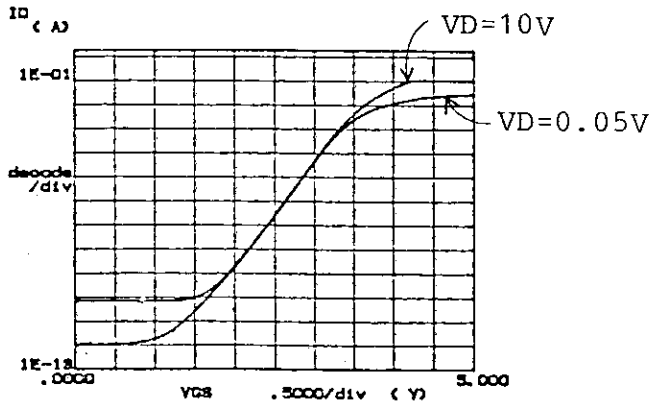
Fig. 2.2 Differences in Electrical Parameters Measured by Various Experimental Procedures Irradiation Condition; 1×10^5R/h, 1×10^5R : Bias Unsupplied : Sample 2SC764, No.6



i-a) Measurement Procedure of Table 2.2

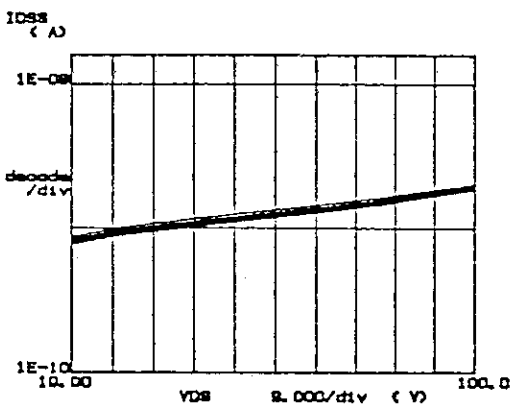


ii-a) Measurement Procedure of Table 2.2



i-b) Measurement Procedure of Table 3.6

i) Relationship between V_{GS} and I_D



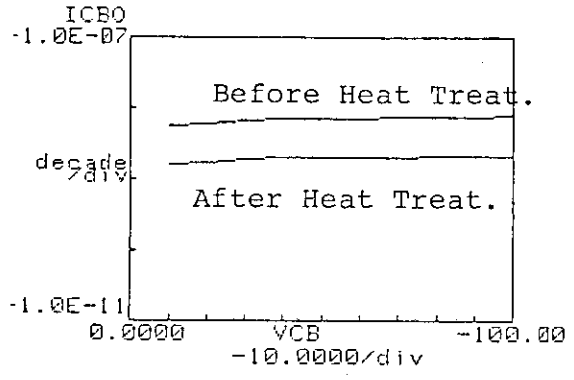
ii-b) Measurement Procedure of Table 3.6

ii) Relationship between V_{DS} and I_{DSS}

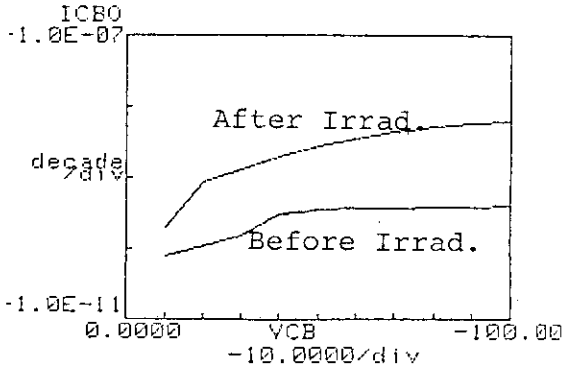
Fig. 2.2 (Continued)

Irradiation Condition ; 3×10^4R/h, 3×10^4R

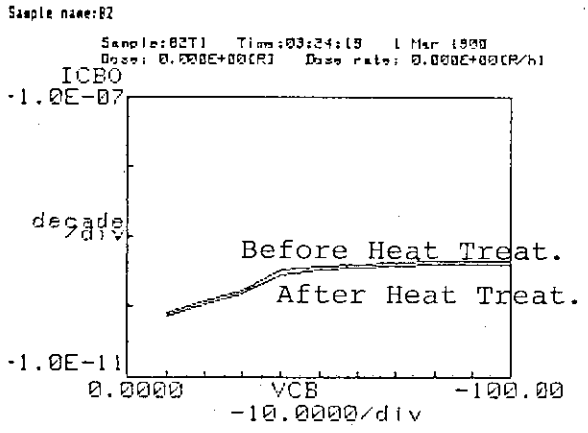
Bias Unsupplied : Sample 2SK458,No.2



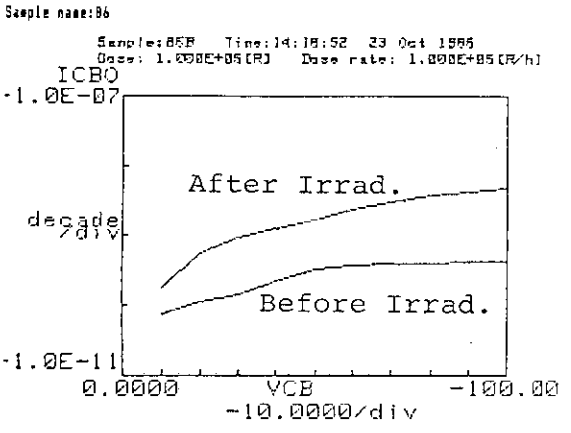
i-a) No.1 Sample



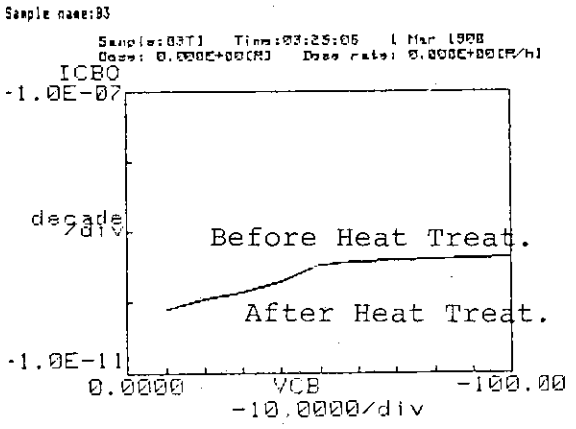
ii-a) No.5 Sample



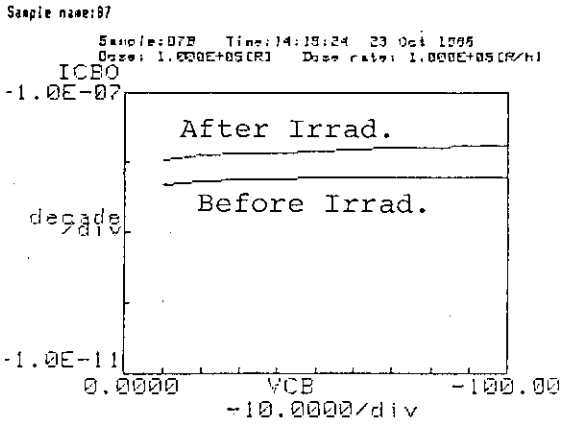
i-b) No.2 Sample



ii-b) No.6 Sample



i-c) No.3 Sample

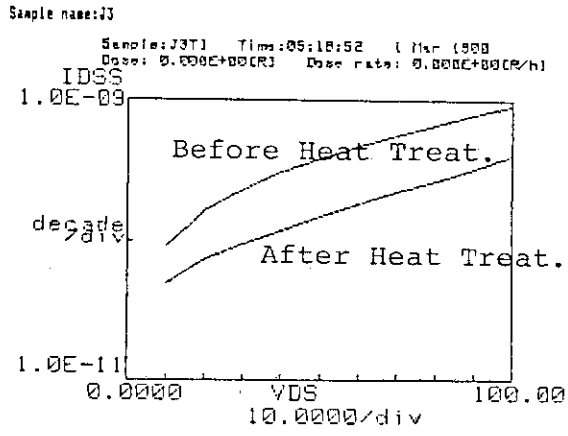


ii-c) No.7 Sample

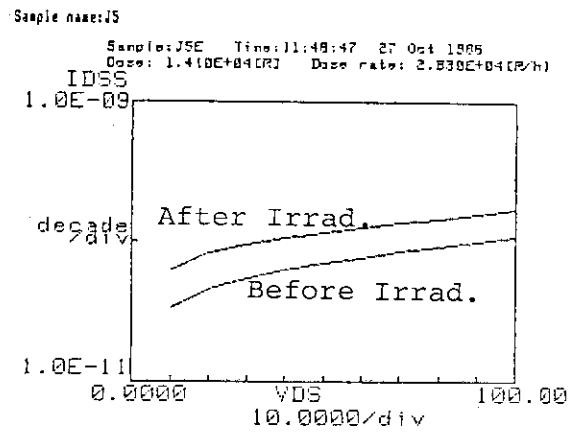
i) Heat Treatment
(100°C, 3h)

ii) Irradiation
($1x10^5$R/h, $1x10^5$R)

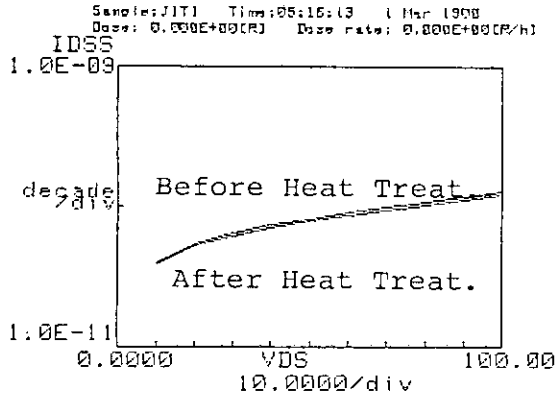
Fig. 2.3 Effect of Heat Treatment or Irradiation on Bi-polar Transistor (2SB603)



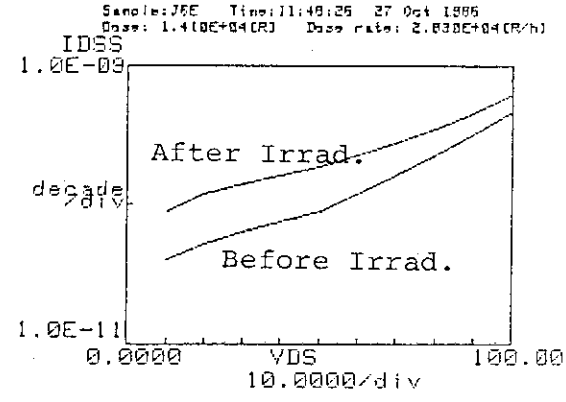
i-a) No.3 Sample



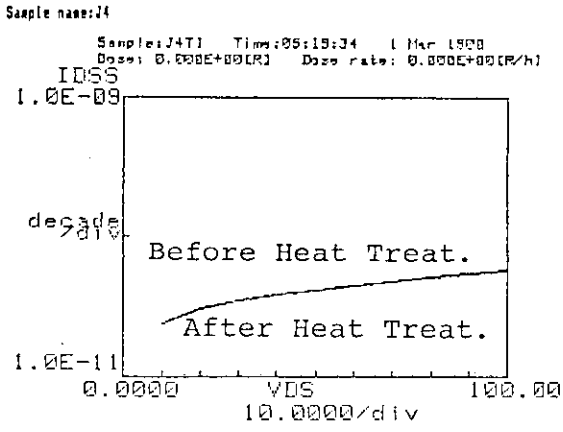
ii-a) No.5 Sample



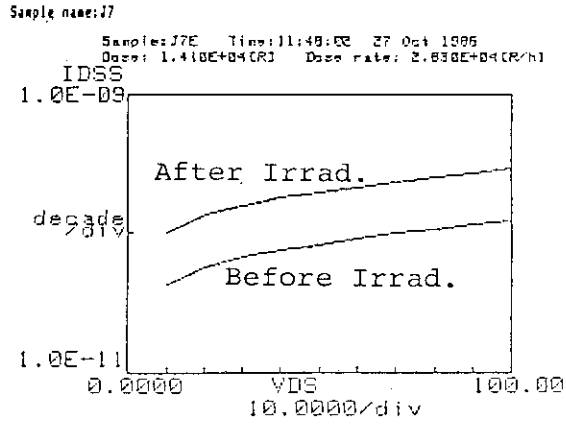
i-b) No.1 Sample



ii-b) No.6 Sample



i-c) No.4 Sample



ii-c) No.7 Sample

i) **Heat Treatment**
(100°c, 3h)

ii) Irradiation
(2.8×10^4R/h, 1.4×10^4R)

Fig. 2.4 Effect of Heat Treatment or Irradiation on MOS Transistor (2SK458)

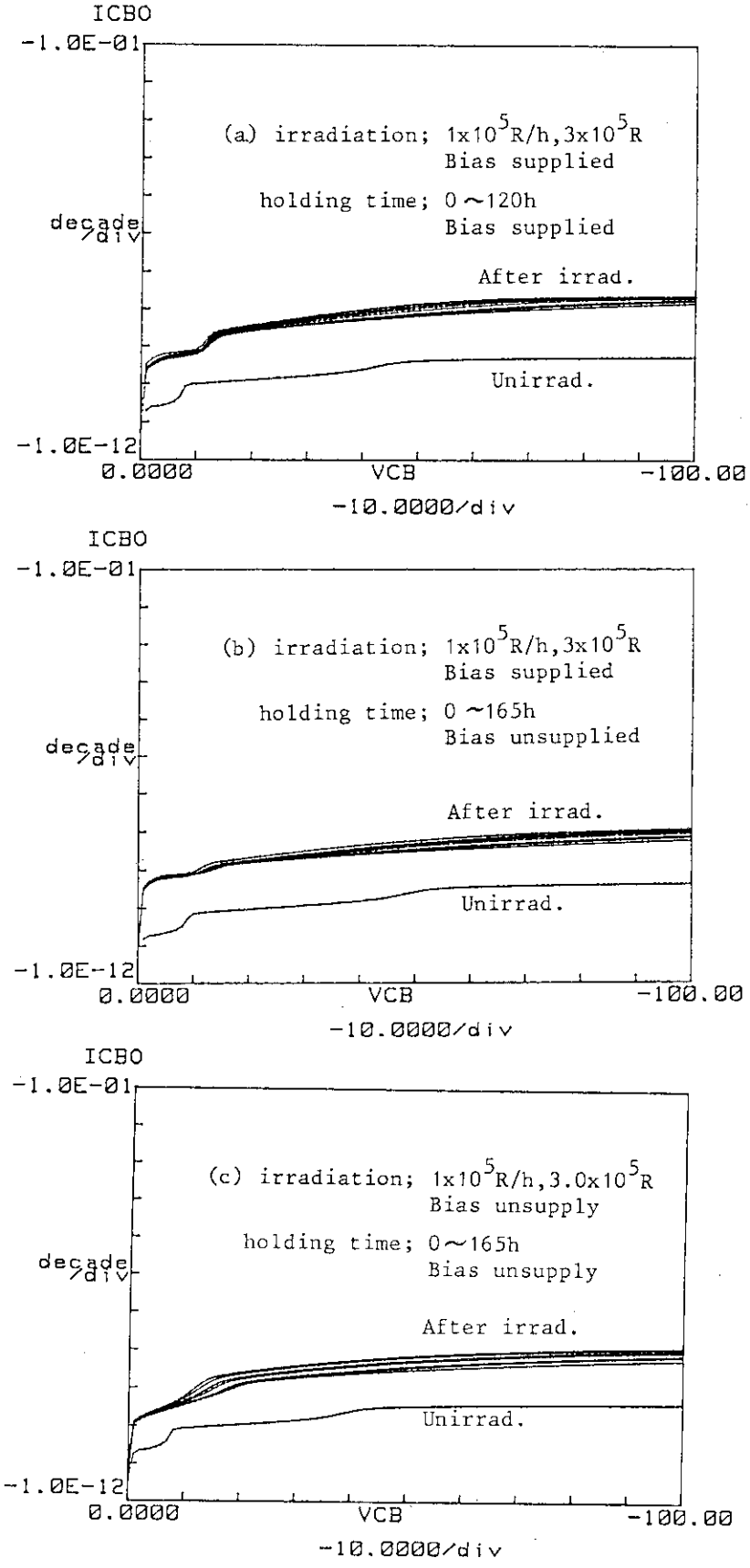


Fig. 2.5 Changes in I_{CBO}(2SB603) as Function of Time Elapsed after Irradiation.

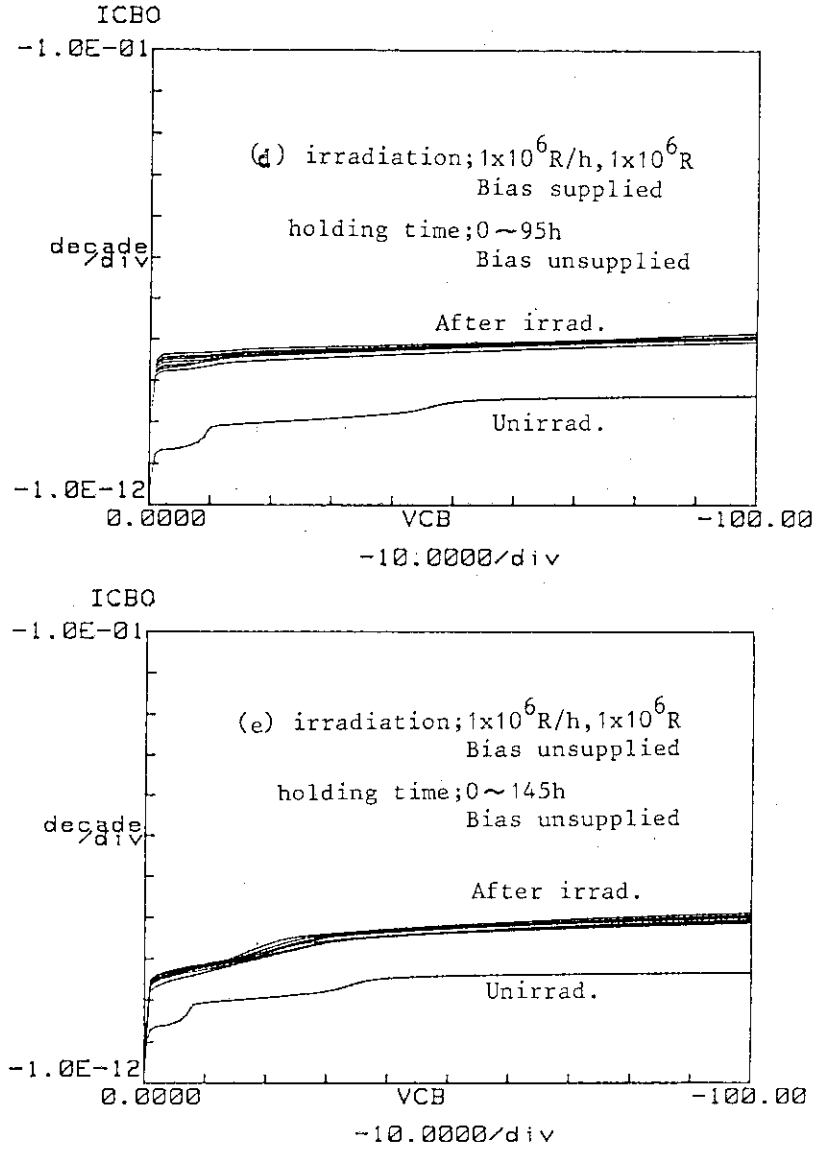


Fig. 2.5 (Continued)(2SB603)

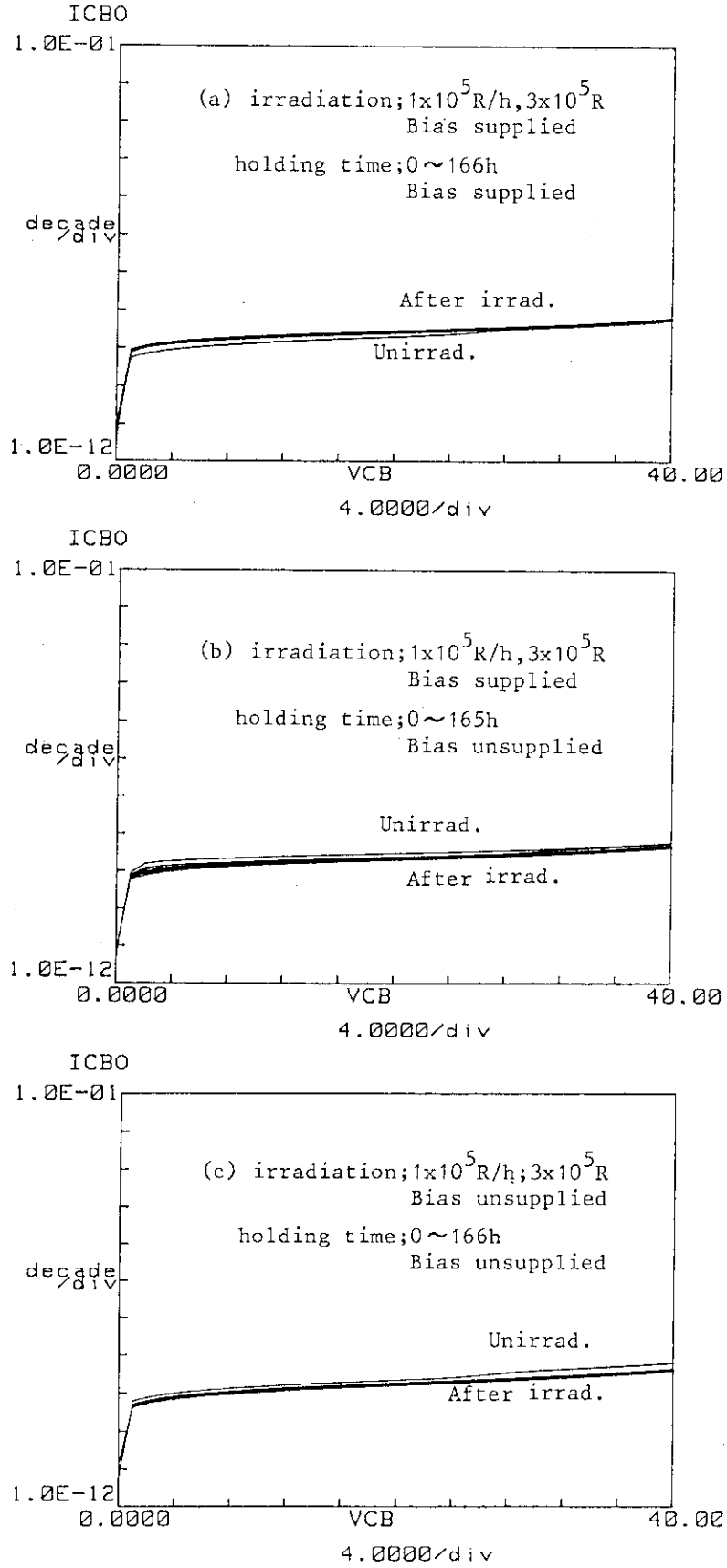


Fig. 2.6 Changes in I_{CBO}(2SC764) as Function of Time Elapsed after Irradiation.

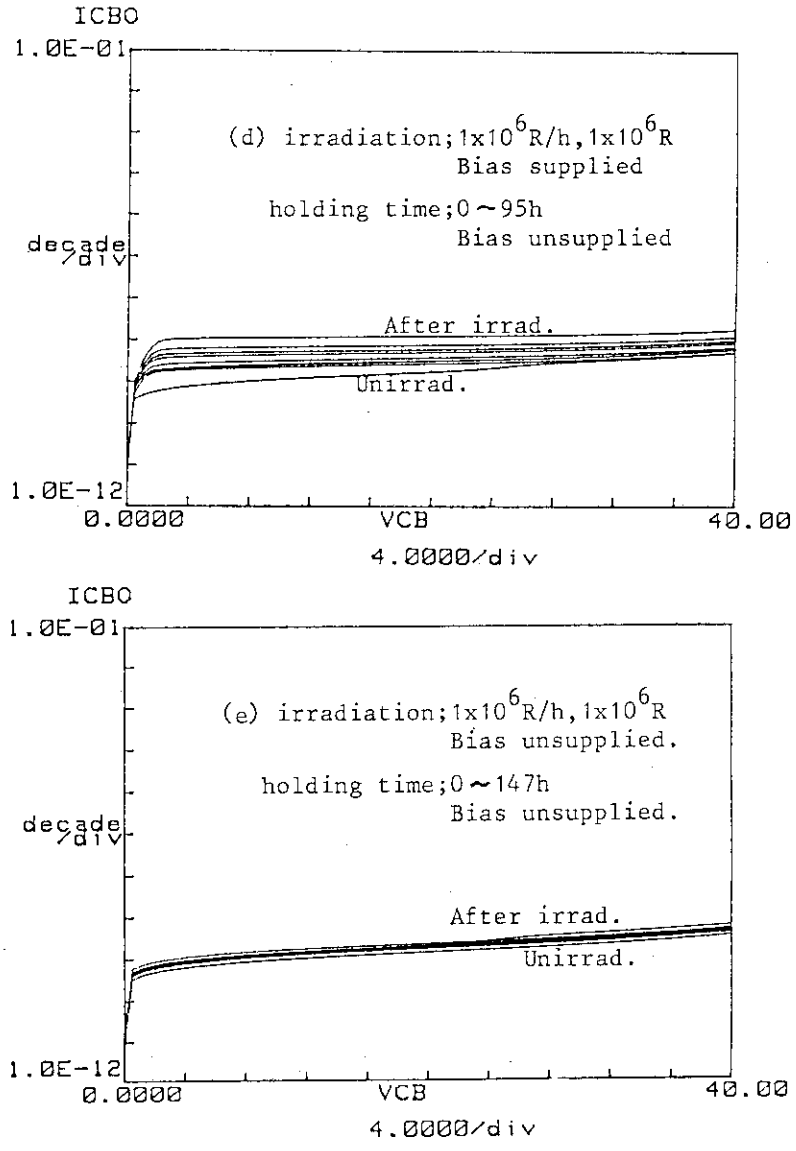


Fig. 2.6 (Continued) (2SC764)

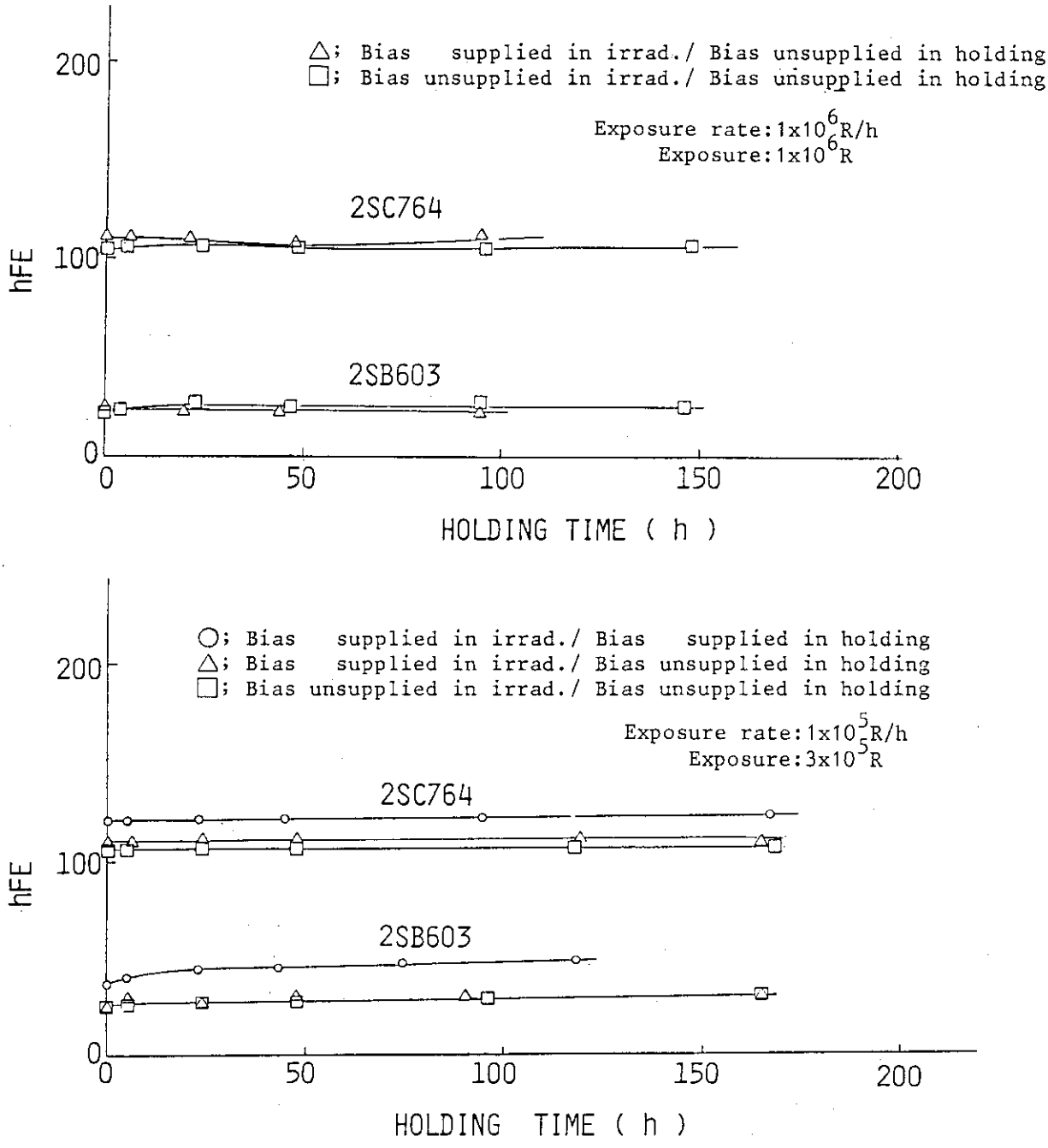


Fig. 2.7 $h_{FE}(I_C=10^{-2}A)$ of Bi-polar Transistor vs. Time Elapsed after Irradiation.

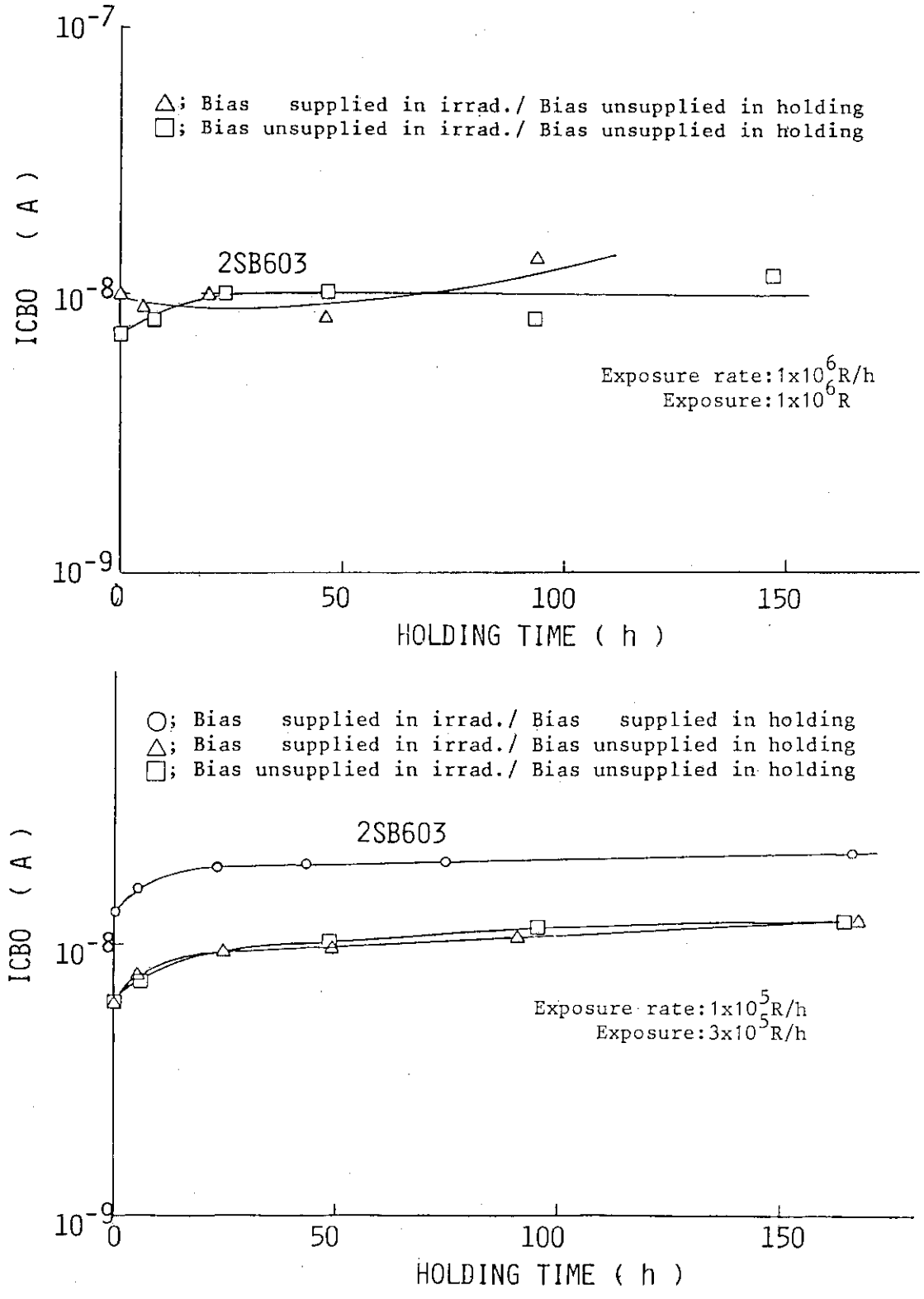


Fig. 2.8 $I_{CBO}(V_{CB}$=-100V) of 2SB603 vs. Time Elapsed after Irradiation.

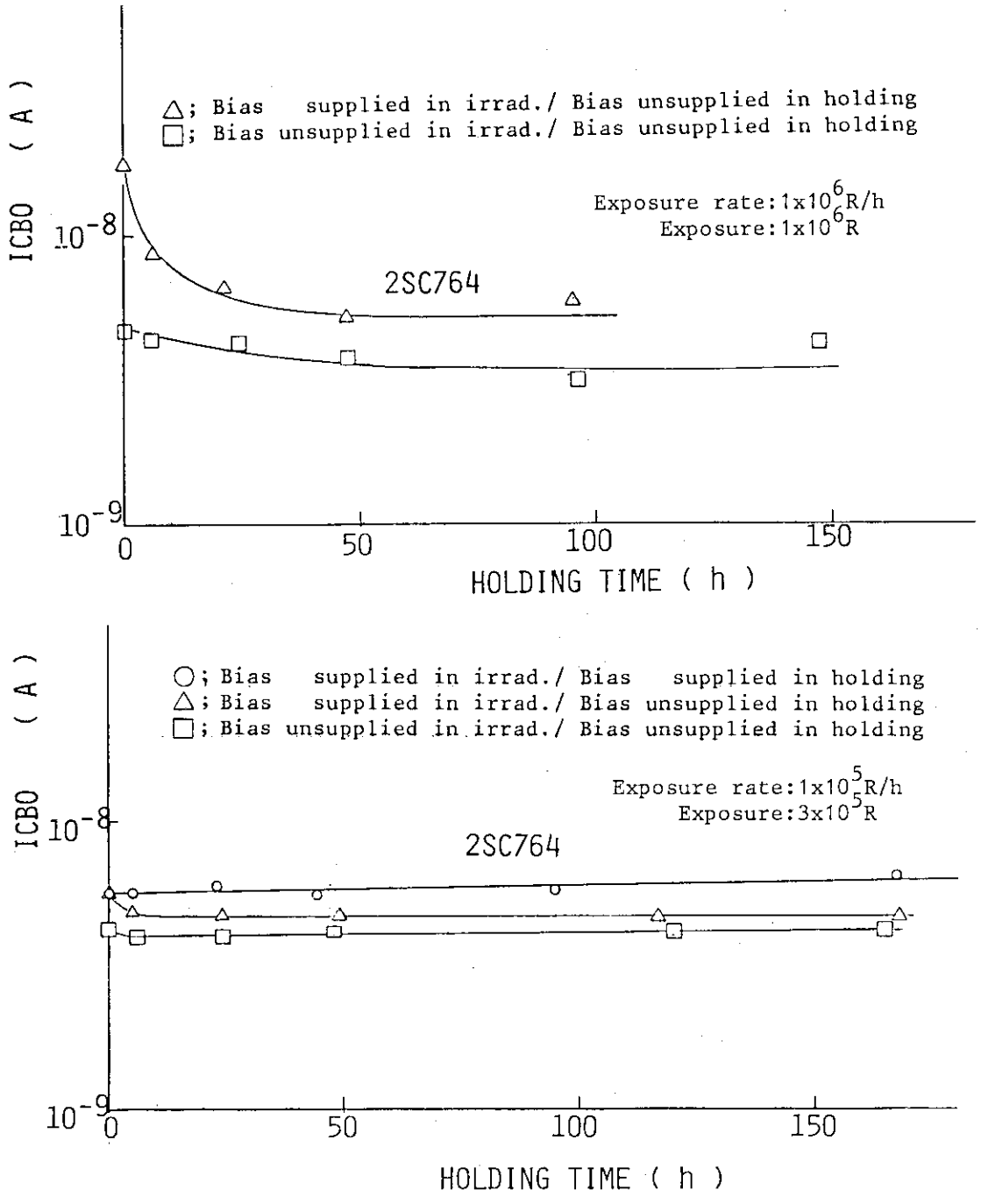


Fig. 2.9 $I_{CBO}(V_{CB}=40V)$ of 2SC764 vs. Time Elapsed after Irradiation.

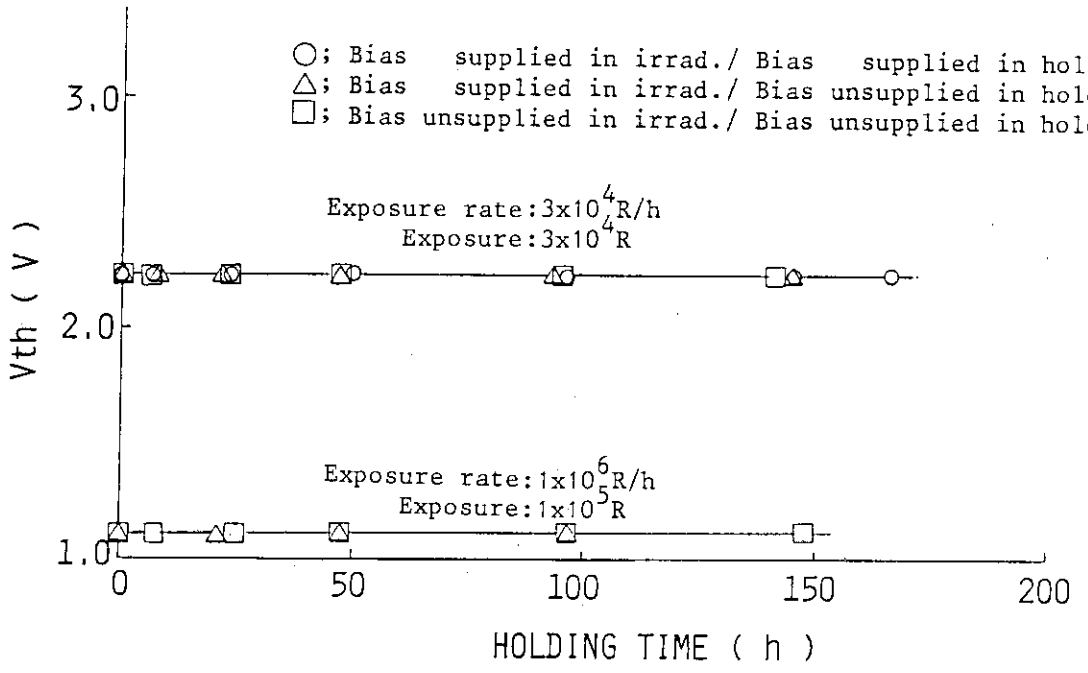


Fig. 2.10 V_{th} of 2SK458 vs. Time Elapsed after Irradiation.

3. トランジスタの電気特性における線量率依存性

3.1 目　的

前述したように，半導体デバイスの照射劣化は（吸収）線量のみならず線量率，バイアスの有無，照射時温度などに依存することが知られている。本章では比較的構造が単純であるバイポーラトランジスタ（２ＳＢ603及び２ＳＣ764），パワーＭＯＳトランジスタ（２ＳＫ458）を選び，γ線照射による線量率効果を詳しく調べた。また，電子線照射も行いγ線照射と比較した。

3.2 実　験

3.2.1 試料及び前処理

試料はバイポーラトランジスタ２種，ＭＯＳトランジスタ１種，すなわち①ＰＮＰ三重拡散型シリコントランジスタ（高耐圧低速度スイッチング用，以下２ＳＢ603，ＮＥＣ製），②ＮＰＮエピタキシアル型シリコントランジスタ（高速度スイッチング高周波増幅用，同２ＳＣ764，ＮＥＣ製）及び③Ｎチャンネルパワー ＭＯＳＦＥＴ（スイッチング用，同２ＳＫ458，ＮＥＣ製）の３種類である。これらはＮＥＣの市販のトランジスタであるが，特性のバラつきを少なくするため，いずれも各々１枚のウエハから作製したものであり，特性をTable 3.1に示す。

照射に用いる試料の特性を安定させるために，全ての試料について照射前に熱処理を行った。条件はTable 3.1の各試料の絶対最大定格で示されている保存温度の最高値，すなわち２ＳＢ603及び２ＳＣ764は175℃（２ＳＣ764は一部200℃），２ＳＫ458は150℃で各々３時間であった。この熱処理条件をTable 3.2に示す。

3.2.2 線源及び照射方法

照射は，^{60}Coγ線照射と加速器による電子線照射を行った。

(1) γ線線源及び照射方法

^{60}Coγ線照射は，日本原子力研究所高崎研究所食品コバルト棟及びＲＩコバルト棟の照射施設を用いた。トランジスタの照射線量率が1×10^{6}Ｒ／hから1×10^{2}Ｒ／hまでの広い範囲にわたるため，線量率に従ってTable 3.3に示す各照射室を使用した。照射線量率は，各照射室にて電離箱を使用して線量測定を行い決定した。線量は照射線量（単位，レントゲン）表示とした。吸収線量（rad (si)）への換算は，シリコン原子の換算係数0.875を照射線量にかけることにより求められる。トランジスタの照射は，各照射条件について各々５個ずつ行い，さらに，①バイアスをかけた状態，②バイアスをかけない状態の２つの場合について行った。Fig. 3.1にバイアス有りの場合の照射用治具を示す。治具は横70mmx縦150mmx奥行き74mmでソケット部，

バイアス回路部で構成されている。トランジスタの挿入用ソケットはエポキシガラス基板に，5個一組で取り付けられている。また，バイアス回路部は抵抗素子から構成されており，電源回路は含まれていない。これはバイアス印加回路が照射場におかれることを考慮したもので，バイアスの印加は，本体横のコネクタに接続したリード線を通して照射室の外側に設置した電源から供給した。

Fig. 3. 2に各トランジスタのバイアス印加回路を示す。２ＳＢ603へのバイアス印加は，V_{CB}を−20Ｖに設定し，V_{EB}を上げてI_Cが−10mA になるように設定した。このとき，１ＫΩの抵抗器の電圧降下により，V_{CB}は−10Ｖになる。２ＳＣ764は，V_{CB}＝10Ｖ，I_C＝２mA，また，２ＳＫ458は，V_{DS}電源を10Ｖに設定した。各試料のバイアス印加状態は，照射治具のピン間の電圧を測るとともにバイアス回路部の抵抗間の電圧降下により確認した。

照射は，照射用治具に試料をセットした後バイアスを印加し，該当する各照射室の所定の線量率の位置にトランジスタの基板の中心が重なり，照射方向がトランジスタのチップ面に対し垂直になるようにセットして行った。高線量率で低線量の照射を行う場合，照射時間が短いため線源の昇降に伴う余剰線量を補正した。このため実際の照射時間より短い時間の照射を行った。

一方，バイアス無の場合の照射は，各トランジスタを５個一組とし照射台に取り付けて行った。照射方法は上述したバイアス有と同様である。いずれの照射も室温，空気中で行ったが，照射室の温度は約25℃でほぼ一定であった。

Table 3. 4に線量率を変化させて行った実験の照射条件を一覧表にして示す。

(2)　電子線加速器及び照射方法

日本原子力研究所高崎研究所１号電子線加速器[6]（２Mev，60kW）を用いた。電子線の線量率はＣＴＡ線量率計[7]で測定した後，γ線照射との比較を行うため，係数（１／f＝1.07）を用いてＣＴＡ吸収線量を照射線量レントゲン（Ｒ）に換算した。トランジスタの電子線照射を行う場合，電子線の物質透過性がγ線に比べてきわめて低いため，トランジスタのカバーによる遮蔽効果を考慮する必要がある。照射に用いた三種類のトランジスタのカバーはいずれも0.25～0.3mm厚のスズメッキした鉄材であるので，Depth Does Curve（電子平衡も考慮してある）からシリコンチップ表面の照射線量を計算で求め，これをトランジスタの照射線量とした。

照射は電子線の加速エネルギー１MeVで10^4～10^7Ｒ，同２MeVで10^4～10^6Ｒの範囲で行った。加速器では，線量率を最低としても約１x10^5Ｒ／ｓであることから，10^4及び10^5Ｒの照射は１秒以下の照射時間となり，実験操作上照射線量の誤差が大きくなる。そこで10^4Ｒ及び10^5Ｒ照射はコンベア照射とし，10^6Ｒ及び10^7Ｒ照射は固定照射とした。コンベア照射，固定照射の加速器の出力及び線量率などをTable 3. 5に示す。

トランジスタの電子線照射は，各照射線量で各々試料５個とし，γ線照射でバイアスの効果がきわめて小さかったことからバイアス無で行った。

照射方法は，照射台にトランジスタを５個１組として取り付け，電子線加速器窓下でコンベア上を水平に移動，または固定して照射した。照射は室温，空気中で行ったが室温は約25℃であった。上述の照射条件では，経験から試料の照射による昇温は50℃以下におさえられていると考えられる。Table 3. 5に電子線照射実験における照射条件を一覧表にして示す。

3.2.3　測定

未照射及び照射トランジスタの電気特性測定には，前章で述べた半導体直流パラメータ解析装置（ＹＨＰ製4145Ａ）による特性解析システムを用いた。

特性測定はすべて照射終了後直ちに開始したが，試料数が多いので測定には１～５時間程度かかった。また，測定は温度23℃，湿度55％の恒温恒湿室で行った。

測定項目は，２ＳＢ603，２ＳＣ764のバイポーラトランジスタで４項目，２ＳＫ458のＭＯＳトランジスタで５項目の測定を行った。これらの測定は，前章で述べたようになるべく広い範囲を，変数のStep数を多くして（変化量を小さくして）行った。Table 3.6に測定項目の詳細を示す。

スイッチング時間（t_{on}，t_{off}，t_{stg}，$t_{d(on)}$，t_r，$t_{d(off)}$，t_f）に関する測定はＮＥＣで行った。スイッチング時間の測定回路をFig.3.3に示す。測定はバイポーラトランジスタでは入力として50μsの基準パルスを用い，その時のベース電流波形とコレクタ電流波形とをオシロスコープにより観察してターンオン時間t_{on}，蓄積時間t_{stg}，下降時間t_f，ターンオフ時間t_{off}を求めたものである。パワーＭＯＳトランジスタでは，ゲート・ソース間に２ＳＫ458の温度特性に比べ十分速いターンオン時間，及び十分長い持続時間を持つ所定の入力パルスを加えた時の出力波形をオシロスコープで観察して，オン時遅延時間（$t_{d(on)}$），立ち上がり時間（t_r），オフ時遅延時間（$t_{d(off)}$），下降時間（t_f）を求めた。照射試料の輸送等のため，このスイッチング時間の測定は照射後１～３週間程度室温放置後測定した。

3.3　実験結果と考察

測定結果のプロットには，各照射点で５ケ得られた測定値のうち，未照射及び照射後の測定値が他と大幅に異なっているものを除いて，残りの値の平均値を用いた。以下に各トランジスタについての照射結果と考察を示す。

3.3.1　２ＳＢ603（ＰＮＰ）トランジスタのγ線照射効果

(1)　電流増幅率（h_{FE}）（バイアス印加）

Fig.3.4にバイアスをかけながら線量率を変えて照射した時のベース・エミッタ間電圧V_{BE}に対するベース電流I_B，コレクタ電流I_Cの変化を示す。いずれの照射線量率においても，照射によりベース電流I_Bが増加するがコレクタ電流I_Cはほとんど変わらない[8]。バイポーラトランジスタのエミッタ接地電流利得（電流増幅率）は，$h_{FE}=I_C/I_B$で与えられる。Fig.3.5にコレクタ電流I_Cに対するベース電流I_B及び電流増幅率h_{FE}の照射による変化を示す。照射線量が増えるに従ってベース電流I_Bが増大するために，h_{FE}は逆に低下する。すなわちh_{FE}の照射によるI_Bの変化に起因する。

コレクタ電流$I_C=1\times10^{-2}$Ａにおける電流増幅率の照射後の値を同じく未照射時の値で除した変化率，すなわちh_{FE}（照射後）／h_{FE0}（照射前）の変化を線量及び線量率に対して図にしたものをFig.3.6の(a)及び(b)に示す。

いずれの線量率においても，照射線量が増すに従ってh_{FE}の変化率は減少[9]するが，10^5R前後

から逆に残率が増加する回復現象を示す。線量 1×10^5R以下では同一線量で比較した場合，線量率の低い方がh_{FE}の変化率，すなわち，照射後のh_{FE} の低下が大きい。例えば，線量 3×10^4R で比較すると照射後のh_{FE}の低下は 1×10^2R／hで初期値の 0.47であるが，1×10^6R／h で同じく 0.72である。h_{FE}の変化率曲線の低下の傾きはほとんど同じである。線量 1×10^5R以上では，いずれの線量率（但し 1×10^6R／h を除く）においても，h_{FE} の変化率は回復現象を示し，特に，10^2及び10^3R／hの低線量率照射において顕著である。回復現象の始まる点（h_{FE} の変化率曲線の直線部分からのずれの始まる点）はh_{FE}の低下率が 0.3 ～ 0.5 で起こり，照射時間（線量）で表すと10^2R／hの低線量率では 300h （3×10^4R），10^3R／hでは60h（6×10^4R），10^6R／hの高線量率では18min（3×10^5R）であった。

以上のことから，２ＳＢ 603のγ線照射ではh_{FE}を低下させる要素と回復させる要素とがあり，これらは線量率依存性を示す。低線量率照射は低線量ではh_{FE}の低下が大きいが，照射線量が 1×10^5R を超えるとh_{FE}の回復効果が大きくなる。

(2) 逆方向飽和（またはリーク）電流（I_{CBO}及びI_{EBO}）及び飽和電圧（$V_{BE(sat)}$及び$V_{CE(sat)}$）（バイアス印加）

Fig.3.7 及びFig.3.8 にバイアスをかけながら線量率を変えて照射した時のコレクタ・ベース間及びエミッタ・ベース間の逆方向飽和（リーク）電流（I_{CBO}及びI_{EBO}）の変化を示す。線量が増すにつれて逆方向飽和電流も増大する。未照射と比べ 1×10^6R では I_{CBO}，I_{EBO} ともに約２～３桁増加する。

Fig.3.9 の(a)，(b)及びFig.3.10の(a)，(b)に$V_{CB} = -100$Vの時の照射によるI_{CBO}の増加量及び$V_{EB} = -5$Vの時の同じくI_{EBO}の増加量を線量及び線量率に対して示す。リーク電流の照射による増分ΔI_{CBO}，ΔI_{EBO}は，h_{FE} の照射による変化と同様に，線量が増加するに従って増大し，2×10^5R 前後から特に低線量率照射において回復現象を示す。同一線量で比較すると，1×10^2R／h の低線量率の方が 1×10^6R／h の高線量率にくらべてリーク電流の増分，ΔI_{CBO}，ΔI_{EBO} が共に大きい。

ΔI_{CBO}，ΔI_{EBO}曲線のピーク，すなわち，これらの回復の始まる線量は 1×10^2R／h照射で 2×10^5R，1×10^3R／h照射で 3×10^5R であった。これは上述したh_{FE}の変化曲線のボトム，すなわち 1×10^2R／h照射で 2×10^5R，1×10^3R／h照射で 3×10^5R と一致する。ΔI_{CBO}とΔI_{EBO} の比較ではΔI_{EBO}はΔI_{CBO}より値が２桁ほど小さく，かつ，1×10^6R／h の高線量率照射においても回復現象を示している。これは，エミッタ・ベース及びベース・コレクタでの不純物濃度の違いなどによるものと考えられる（Fig.3.12(a)参照）。

以上のリーク電流の増分ΔI_{CBO}及びΔI_{EBO}の照射による変化は，上述したh_{FE}の変化とほぼ同じ傾向を示すことから，照射によるh_{FE}の低下及びリーク電流の増分ΔI_{CBO}及びΔI_{EBO} の増加は同じ原因によるものと考えるのが妥当であろう。

Fig.3.11に各線量率におけるコレクタ電流に対するベース・エミッタ間飽和電圧（$V_{BE(sat)}$）及びコレクタ・エミッタ間飽和電圧（$V_{CE(sat)}$）の測定結果を示す。$V_{BE(sat)}$ は照射によってほとんど変化しないが，$V_{CE(sat)}$ はいずれの線量率においても線量が増すに従って大きく変化する。

Fig.3.12(b)及びFig.3.13に線量率をパラメータとして，コレクタ電流－60mAと－100mA

におけるエミッタ・ベース間飽和電圧$V_{BE(sat)}$及びエミッタ・コレクタ間飽和電圧$V_{CE(sat)}$の線量による変化を示す。

$V_{BE(sat)}$はすべての線量率において線量によってまったく変わらない。$V_{CE(sat)}$は3×10^4R以下では低線量率（10^2及び10^3R／h）の方が照射による変化が大きいが，10^5R以上では低線量率照射では$V_{CE(sat)}$の値が飽和する傾向を示す。しかし，1×10^6R／h照射では$V_{CE(sat)}$は加速的に大きな値となる。飽和領域ではV_{CE}の値が小さいために，エミッタ接合もコレクタ接合も順バイアスになっており，コレクタ電流I_CはV_{CE}にほぼ比例して増大する。この状態ではエミッタから注入された伝導正孔密度がベース領域で非常に高くなっており，また，ベース領域で電子と正孔の再結合も盛んに起こっている。従って，両接合とも短絡状態に近い。図から照射により$V_{CE(sat)}$が大きくなる，すなわちコレクタ抵抗が大きくなることが分かる。しかし，これも低線量率照射では10^5R程度よりほぼ飽和する傾向を示す。また，$V_{BE(sat)}$と$V_{CE(sat)}$における違いは，エミッタとコレクタの電極面積が異なることと飽和電圧の発生メカニズムが異なるためと考えられる。

(3) スイッチング時間（バイアス印加）

バイポーラトランジスタのスイッチング時間とはFig. 3.14(a)の(A)のような入力波形を加えたときの出力に現れる波形(c)に示される時間が用いられる。t_d＝遅延時間（delay time）は入力パルスが加わってから出力電流波形が最大振幅の10％に達するまでの時間，t_r＝上昇時間（rise time）は出力電流波形が最大振幅の10％から90％に増加するのに要する時間，t_{stg}＝蓄積時間（storage time）は入力パルスがなくなってから，出力電流波形が最大振幅の90％まで減少するまでの時間，t_f＝下降時間（fall time）は出力電流波形が最大振幅の90％から10％まで減少するのに要する時間，及びt_{on}＝ターンオン時間（turn on time）は$t_{on}=t_d+t_r$，t_{off}＝ターンオフ時間（turn off time）；$t_{off}=t_{stg}+t_f$である。

Fig. 3.15～Fig. 3.17にバイアスをかけながら線量率を変えて照射した時のターンオン時間t_{on}，蓄積時間t_{stg}及び下降時間t_fの変化率＝［（照射後の値－未照射時の値）／（未照射時の値）］x 100を照射線量に対してプロットした。ターンオン時間t_{on}の変化率は，各線量率において3×10^4R付近より線量とともに徐々に増大する傾向を示すが，1×10^6Rまではt_{on}の変化率は少ない。線量率による違いは，1×10^6R／hも含めて，きわめて少ない。

蓄積時間t_{stg}の変化率は各線量率とも線量とともに低下していく。そして，低線量率照射では3×10^5R付近から回復の傾向を示すように見える。なお，t_{stg}は少数キャリアのライフタイムの長短による遅れ時間であり，よく知られているように，高速トランジスタではt_{stg}を短くするために，少数キャリアのキラーセンタとして放射線を照射したり，金などの重金属をドープしたりしている。t_{stg}が短くなっていることから，照射により深い準位（deep level）ができていると考えられる。

下降時間t_fの変化率は，10^6Rまでは線量率にも線量にも依存せずほとんど変化がない。t_{on}とt_fは，トランジスタが活性状態にある時間に対応するのでほぼ同様の傾向を示す。

(4) バイアスの影響

Fig. 3.18～Fig. 3.21に増幅率の変化率，コレクタ・ベース間リーク電流増分ΔI_{CBO}，エミッタ・ベース間リーク電流増分ΔI_{EBO}及びエミッタ・コレクタ間飽和電圧$V_{CE(sat)}$の同一照射条

件におけるバイアス有り，無しの場合の結果を比較して示す。h_{FE}の変化率，ΔI_{CBO}，ΔI_{EBO}，$V_{CE(sat)}$ のいずれにおいても，1×10^5及び1×10^6R／hの高線量率照射ではバイアス有りの場合がバイアス無しの場合より照射による各測定値の変化が大きい。しかし，1×10^2及び1×10^3R／hの低線量率における照射では，バイアス有無による照射効果の差は非常に小さく，より詳しくは，10^4Rではバイアス有りの方が，1×10^5Rではバイアス無しの方が照射による各測定値の変化が大きい。

各測定において得られた値の変化は小さいが，２ＳＢ603の照射におけるバイアス効果としてh_{FE}を始めとする５つの各値についてまったく同じ照射挙動が得られた。一般に，トランジスタはバイアスをかけて照射した方がバイアス無しで照射したものより特性の劣化が大きいとされている。この傾向は本実験においても1×10^6及び1×10^5R／hの高線量率照射で認められるが，1×10^2及び1×10^3R／hの低線量率ではその差は小さく逆の結果が得られた。

Fig.3.22及びFig.3.23に各スイッチング時間におけるバイアス有り，無しの場合の結果を比較して示す。スイッチング時間におけるバイアスの影響はターンオン時間（t_{on}）で明らかに認められるが，下降時間（t_f）ではほとんど認められない。また，線量率による相違も認められない。蓄積時間（t_{stg}）では先のh_{FE}等と同じように1×10^6及び1×10^5R／hの高線量率照射では，バイアス有りの場合の変化率が大きいが，1×10^3及び1×10^2R／hの低線量率ではバイアス無しの場合の変化率が大きい。

以上，２ＳＢ603のγ線照射におけるバイアスの効果は各電気特性値においてあまり顕著には認められなかった。これは，本実験のバイアスのかけ方がトランジスタの順方向であるためと思われる。しかし，高線量率照射と低線量率照射で相違が認められること，ターンオン時間で明らかにバイアスの効果が認められることなどが分かった。

(5)　２ＳＢ603の線量率効果についての考察

Table 3.7に２ＳＢ603のγ線照射結果をまとめて示す。順方向電流，リーク電流，飽和電圧の各特性は，すべて1×10^5R以下では同一線量で比較した場合，1×10^2及び1×10^3R／h の低線量率照射の方が特性の劣化が大きい。1×10^5R以上では，低線量率照射で特性の回復が認められるが，1×10^5及び1×10^6R／hの高線量率照射では，特性の回復が認められない。また，順方向電流，リーク電流等の照射効果ではすべて線量率依存性が認められる。

一方，スイッチング時間の照射効果は順方向電流などとは異なり，いずれのスイッチング時間も線量率による照射効果の違いは認められない。また，t_{on}，t_f は1×10^6Rまでは照射による特性の変化が少ないが，1×10^7R照射すると照射効果が顕著に認められるようになる。

以上のことから，順方向電流，リーク電流等の照射による特性変化とスイッチング時間の照射による特性変化とはトランジスタ中の異なった領域や機構によって起きていると考えられる。

放射線照射によるトランジスタの特性の劣化は，

①　Si結晶内における捕獲中心の増加

②　SiO_2中における正の固定電荷の蓄積

③　SiO_2／Si界面における界面準位の増加

などによるとされている[10,11]。

このうち，①のSi結晶内の照射による捕獲中心の増加は主にスイッチング時間の照射効果に

現れる。これは照射により生成したdeep level の欠陥がキャリアの捕獲中心となり，特にt_{stg}を短縮する効果がある。一般にシリコントランジスタにγ線を10^6R照射した時の捕獲中心の数は，10^{11}個／cm^3 のオーダであり，Si結晶にドープされる不純物密度10^{15}～10^{21}個／cm^3に比べて著しく少ないとされている[12]。また，近年の微細化された素子ではベース幅が少数キャリアの拡散長に比べて狭いため，捕獲中心の影響をほとんど受けない。２ＳＢ603においては，実験の結果から5×10^5Rからt_{stg}，10^7Rからt_{on}，t_fが変化しており，Si結晶内に捕獲中心が生成していると考えられる。②のSiO_2中の固定電荷（正電荷）の蓄積は，ＭＯＳ型トランジスタではしきい値電圧の移動などの影響を及ぼすが，バイポーラ素子では，bulk内のpn接合によって動作するので，SiO_2中の蓄積電荷の影響を受けにくい。従って，２ＳＢ603の1×10^6R以下の照射で認められる増幅率の低下（ベース電流の増加），リーク電流の増加などは③のSiO_2／Si界面における界面準位の増加が主たる原因と考えられる[13]。

一般に酸化膜（SiO_2）中のシリコン未結合手が正の固定電荷として，また，SiO_2／Si 界面のシリコン未結合手が界面準位としてふるまうと考えられている。Sah[14]はこれらの未結合手として(a)≡Si・Trivalent Silicon (b)≡SiO・Nonbridging oxygen (c)Vo Oxygen Vacancy (d)Vsi Silicon Vacancy (e)Oi Interstitial Oxygen (f)Sii Interstitial silicon (g)XY, XYZ higher complexsなどを挙げ，不純物としてH，ＯH，Ｍ（Metallic, Nonmetallic）などを考えている。そして，界面準位などの原因となる正の電荷として，≡Si^+とOi^+を主たるものとして挙げている。また，Mclean[15]らは「Si未結合手は放射線によって解離された水素イオン（H^+）が酸化膜中のSiH，SiOH と反応した結果作られる」としている。これは界面準位生成量の時間依存性，例えば，その生成量が飽和に至るまで約2000 秒の時間を要することから，正孔（酸化膜中の移動度約$2 \times 10^{-5}cm^2$／Ｖ・Ｓ）よりも移動度の小さい正の可動イオン，すなわちH^+が界面準位発生に大きく関係していると考えている。

本実験の結果でも，Fig.3.24に示すように10^5R以下では同一線量においてh_{FE}の変化率の低下（界面準位の発生量）に時間を要する部分もあることから，正孔などよりも移動度の低いH^+やO^+が界面準位の発生に関与しているとも考えられる。また，同図から10^3Ｒ／ｈ以下の線量率では線量率による照射効果の差異は少ないことが分かる。

Fig.3.25に照射直後及び照射後放置による２ＳＢ603のh_{FE}の変化率（h_{FE}/h_{FE0}）の経時変化を示す。低線量率照射では，すでに述べたようにh_{FE}の変化率が回復する傾向を示すが，高線量率照射ではこの傾向が認められない。一方，3×10^4Ｒ前後及び1×10^6Ｒ照射試料を長時間室温に放置した後の経時変化は，約500日経過後もきわめて僅かしかh_{FE}の変化率の回復が認められない。このことから，低線量率照射におけるh_{FE}の変化率の回復は，照射を継続することによって生じていると考えられる。バイポーラトランジスタの1×10^6Ｒ以下の照射劣化の原因が上述したように，主に界面準位や酸化膜中の固定電荷などで起こると考えると，２ＳＢ603についても，ＭＯＳトランジスタの照射におけるリニアシステム理論[16]が成立すると考えられる。しかし，Fig.3.25から明らかなように，リニアシステム理論が成り立つといわれる1×10^6Ｒ以下においても，２ＳＢ603でh_{FE}/h_{FE0}の曲線について10^2Ｒ／ｈから10^6Ｒ／ｈの線量率で共通した実験式の定数を求めることができない。これは照射によるh_{FE}の変化率の回復挙動が，低線量率照射と高線量率で異なるためと考えられる。この問題については，照射による界面準位の生成機構と関

係しており，今後の検討を必要とする。

3.3.2　２ＳＣ764（ＮＰＮ）トランジスタのγ線照射効果

(1)　電流増幅率（h_{FE}）（バイアス印加）

Fig.3.26にバイアスをかけながら線量率を変えて照射した時のベース・エミッタ間電圧V_{BE}に対するベース電流I_B，コレクタ電流I_Cの変化を示す。いずれの照射線量率においても，照射によりベース電流I_Bが増加するがコレクタ電流はほとんど変わらない。Fig.3.27及びFig.3.28に増幅率$h_{FE}=I_C/I_B$の照射による変化を示す。特に，Fig.3.28の$I_C=10^{-2}$Aにおけるh_{FE}の変化率の値は，10^8Rにおいても0.5以上の値を示し，また，線量率依存性も少ない。このことから同じバイポーラトランジスタではあるが，２ＳＣ764は２ＳＢ603に比べてきわめて耐放射線性が高いことが分かる。すなわち，1×10^6Ｒ／ｈでh_{FE}の変化率が約0.5の値となる線量で比較すると，２ＳＣ764は10^8Rであるのに対し２ＳＢ603は10^5Rであり，10^3倍も耐放射線性が優れている。

(2)　逆方向飽和（またはリーク）電流（I_{CBO}及びI_{EBO}）及び飽和電圧（$V_{BE(sat)}$及び$V_{CE(sat)}$）（バイアス印加）

Fig.3.29及びFig.3.30に，バイアスをかけながら線量率を変えて照射したときのコレクタ・ベース間及びエミッタ・ベース間の逆方向飽和電流（I_{CBO}及びI_{EBO}）の変化を示す。また，Fig.3.31は$V_{CB}=40$Vの時のI_{CBO}の値と線量の関係を示す。線量が増すにつれてI_{CBO}及びI_{EBO}も増加するがその変化量は少なく，かつ，線量率依存性もほとんど認められない。

Fig.3.32に各線量率におけるコレクタ電流に対するベース・エミッタ間飽和電圧（$V_{BE(sat)}$）及びコレクタ・エミッタ間飽和電圧（$V_{CE(sat)}$）の測定結果を，また，Fig.3.33に$I_C=10$mAと90mAにおける各照射線量率での線量に対する$V_{BE(sat)}$ (a)，$V_{CE(sat)}$ (b)との関係を示す。Fig.3.33から1×10^8Ｒまでの照射にもかかわらず照射による$V_{BE(sat)}$，$V_{CE(sat)}$の変化はきわめて少ない。

(3)　スイッチング時間（バイアス印加）

Fig.3.34及びFig.3.35に線量率を変えた時の２ＳＣ764のスイッチング時間と線量との関係を示す。t_{on}，t_{off}とも10^6Ｒ以上でごくわずか変化するもののほとんど変らない。また，t_{stg}も線量率によって変化しているように見えるが値そのものは各々未照射時の±５％以内にあり，照射により1×10^8Ｒまでほぼ一定と見なせる。しかしながら，スイッチング時間については，t_{stg}など線量率によって違いがあるような徴候もみられることから，低線量率照射についてより長時間の照射データを測定する必要があると思われる。

(4)　バイアスの影響

Fig.3.36に２ＳＣ764の増幅率，Fig.3.37～Fig.3.39に同じくスイッチング時間のバイアスの影響を示す。増幅率及びt_{stg}にはほとんどバイアスの影響は認められない。しかし，t_{on}，t_{off}の1×10^5及び1×10^6Ｒ／ｈの高線量率照射については，バイアスの影響が認められるように見える。

(5)　２ＳＣ764と２ＳＢ603の照射効果の比較

Table 3.8に同じバイポーラトランジスタである２ＳＣ764と２ＳＢ603のγ線照射効果を

比較して示す。２ＳＣ764は２ＳＢ603に対し，h_{FE}で比較すると10^3倍も耐放射線性が優れ，かつ電気特性の劣化に及ぼす線量率依存性はほとんど認められない。すでに述べたように２ＳＢ603の増幅率，リーク電流，飽和電圧の照射劣化は酸化膜，及び酸化膜／絶縁体界面の照射劣化と考えられ，スイッチング時間のそれはシリコン結晶中に生成した欠陥によると考えられた。これに対し２ＳＣ764では，10^8Rまで照射効果がきわめて少ないことから，酸化膜及び酸化膜／絶縁体界面の劣化並びにシリコン結晶中の欠陥等が非常に生じにくいか，または，これらが生じたとしてもトランジスタの電気特性に影響を及ぼさないかのどちらかであろう。この原因として，２ＳＣ764が高周波用で少数キャリアキラー処理が施されていること，エピタキシアル結晶を用いていること，Ｎ型トランジスタであること，エミッタ，ベース，コレクタの各不純物濃度が２ＳＢ603のそれらよりも高濃度であることが挙げられる。

Fig.3.40に２ＳＣ764のh_{FE}/h_{FE0}の照射停止後の回復を示す。照射停止後の回復はきわめてわずかであり，この点は２ＳＢ603と同様の傾向を示した。

3.3.3　２ＳＫ458（パワーＭＯＳ）トランジスタのγ線照射効果

(1)　２ＳＫ458トランジスタのγ線照射効果（バイアス印加）

Fig.3.41～Fig.3.43に，バイアスをかけながら線量率を変えて照射したときのドレイン電流（I_D），ソース・ドレイン間のもれ電流（I_{DSS}）及びソース・ゲート間のもれ電流（I_{GSS}）の変化を示す。

各線量率でのドレイン電流の変化は，1×10^5Ｒ～1×10^6Ｒ照射においてもI_D曲線が単にゲート・ソース電圧（V_{GS}）の負側に移動（Fig.3.41）するだけで，I_D曲線の傾きは変化しない。

ゲートバイアス（V_{DS}）10Ｖで一定の時のI_{DSS}は3×10^4Ｒ以上照射すると急激に増加し，1×10^5Ｒでは未照射時の値に対し２桁以上，線量率1×10^6Ｒ／ｈで1×10^6Ｒ照射した場合は８桁も増加する。しかし，上述のように，I_D曲線は平行移動しているだけなのでゲート電圧を増すことによりI_Dを減らすことができる。I_{GSS}は1×10^6Ｒ照射まで照射線量及び線量率によってほとんど変化しない。

Fig.3.44及びFig.3.45に，しきい値電圧の移動（ΔV_{th}）及びドレイン・ソース間のもれ電流の増加分（ΔI_{DSS}）の照射による変化を示す。3×10^5Ｒ以上で低線量率長時間照射（10^3Ｒ／ｈ)の方が，高線量率照射よりΔV_{th}の変化が少ないように見える。また，ΔI_{DSS}は1×10^5Ｒ以上の照射で急速に増大するが1×10^6Ｒ／ｈの高線量率照射における変化が大きい。

ＭＯＳトランジスタのスイッチング時間には，Fig.3.14(b)の(A)のような入力波形を加えたときの出力に現れる波形(B)に示される時間が用いられる。$t_{d(on)}$＝オン時遅延時間（on-delay time）は，入力パルスが加わってから出力電流波形が最大振幅の10％に達するまでの時間，t_r＝立ち上がり時間（rise time）は出力電流波形が最大振幅の10％から90％に増加するのに要する時間，$t_{d(off)}$＝オフ時遅延時間（off－delay time）は入力パルスが無くなってから，出力電流波形が最大振幅の90％に減少するまでの時間，t_f下降時間（fall time）は出力電流波形が最大振幅の90％から10％まで減少するのに要する時間及びターンオン時間（turn on time）は$t_{on}=t_r+t_{d(on)}$，ターンオフ時間（turn off time）は$t_{off}=t_f+t_{d(off)}$で示される。

Fig.3.46及びFig.3.47に，バイアスをかけながら線量率を変えて照射した時の立ち上がり時

間t_r，オン時遅延時間$t_{d(on)}$，下降時間t_f，オフ時遅延時間$t_{d(off)}$の変化率＝［（照射後の値－未照射の値）／（未照射の値）］x100 を照射線量に対してプロットした。線量率による違いは認められない。立ち上がり時間（t_r）及び下降時間（t_f）は，10^5R照射から大きく増加するがオン時遅延時間（$t_{d(on)}$）及びオフ時遅延時間（$t_{d(off)}$）では線量に対し比較的ゆるやかな変化を示す。スイッチングのターンオン時間$t_{on}=t_r+t_{d(on)}$であるから，t_rと$t_{d(on)}$は照射に対して逆方向に変化するのでt_{on}の照射による変化は，1x10^6R照射でも40%程度の変化である。しかし，照射によりt_f，$t_{d(off)}$共に増加するのでターンオフ時間$t_{off}=t_f+t_{d(off)}$は，1x10^5R照射以上で顕著に増大する。通常照射によりシリコン中に欠陥準位等が生成し，$t_{d(on)}$等は減少するとされているが，同様な照射劣化挙動を示すと考えられる$t_{d(off)}$が照射により増加する理由は不明である。

Fig.3.48にΔV_{th}，及びFig.3.49～Fig.3.52に，スイッチング時間のバイアスの影響を示す。バイアスの影響は，ΔV_{th}及びスイッチング時間の$t_{d(on)}$，$t_{d(off)}$では明瞭ではないが，スイッチング時間のt_r，t_fにおいて3x10^5R以上の照射で明らかに認められる。

(2) 2SK458トランジスタのγ線照射効果についての考察

2SK458は，2重拡散型MOS FET（Double Diffused MOS FET：DMOS FET）で，その構造をFig.3.53に示す。DMOS FETは，チャンネルが同一拡散層により拡散されるP型及びN型拡散層の深さの差により形成されるため，チャンネル長を2μm程度に微細化できる。この構造は比較的容易に高耐圧，低オン抵抗が得られる特徴がある。

一方，MOS構造にγ線を照射した場合，絶縁体（主にSiO_2）中に電子－正孔対が発生する。絶縁体中での電子の移動度は室温で20cm^2／V・Sになるのに対し，正孔の移動度は2x$10^{-5}$$cm^2$／V・Sであり，電子はわずかな電界で絶縁体中から取り除かれ，正孔が絶縁体中に捕獲される。また，この絶縁体中の正孔がバイアス等により移動し，絶縁体／半導体界面準位を生成する。前者の絶縁体中の正孔の捕獲，蓄積によりMOSトランジスタのしきい値電圧が負方向へ移動する[17]。また，後者の絶縁体／半導体界面準位の生成によりV_{GS} vs. I_D曲線の傾きが変化する。

以上のこと及びFig.3.41のI_D曲線の照射による変化が傾きは変化せずに単にV_{GS}の負電圧方向に移動するだけであることから，2SK458では絶縁膜中に正孔が捕獲されているが，絶縁体／半導体界面準位の生成はほとんど認められないことが分かる。界面準位がほとんど生成しないのは，①先の2重拡散型MOSFETの構造に見られるように絶縁体の下にN^+層があり，これが絶縁体／半導体界面準位に生成する正孔捕獲準位を一部キャンセルする，②チャンネル長が短く，従って半導体界面でのキャリアの散乱が少ない，③絶縁体が二重構造（例えば，SiO_2，SiNまたは，熱酸化SiO_2膜，CVD SiO_2膜）になっており，絶縁体に生成した正孔の絶縁体／半導体界面への移動が少ない，④ゲートに電圧をかけないで照射している（Fig.3.2参照），⑤界面準位を生成させるほどの照射量に至っていない等が考えられる。また，2SK458の絶縁体中の正電荷の蓄積は1x10^5R照射以上で顕著となるが，これは絶縁体膜厚，絶縁体の造り方などにも依存するので明確なことは分からない。

スイッチング時間においては，照射による絶縁体中の正電荷の蓄積や絶縁体／半導体界面準位の生成のために立ち上がり時間t_r，下降時間t_fが増加しさらに，これらに加えて照射によ

る半導体中の結晶欠陥などの深い準位の生成によりオン時及びオフ時遅延時間 $t_{d(on)}$, $t_{d(off)}$ が変化する。特に後者の $t_{d(on)}$, $t_{d(off)}$ は欠陥などの深い準位により通常照射により減少する傾向を示すと考えられる。Fig.3.46及びFig.3.47の t_r, t_f の変化は，ΔV_{th} 及び ΔI_{DSS} の変化と同様に 1×10^5 R照射以上で顕著に変化しており，このことから t_r, t_f の照射による変化は絶縁体の正電荷の蓄積の影響によると考えられる。これに対し $t_{d(on)}$, $t_{d(off)}$ の照射による変化は 1×10^6 R照射でも t_r, t_f に比べて少なく，半導体中の欠陥準位の生成等が絶縁体の照射劣化に比べて起こりにくいことを示している。先に述べたが，$t_{d(on)}$ と $t_{d(off)}$ とは同様な劣化機構によって特性が変化すると考えられるが，$t_{d(off)}$ が照射により増加していく理由は明確ではない。

バイアスの影響は ΔV_{th} 等でほとんど認められなかったが，本実験ではFig.3.2に示すようにゲート電圧をアース（ソースに接続）してドレインに電圧をかける方法より，実使用にそくしたバイアスのかけ方をしているためと考えられる。

Fig.3.54に，2SK458のしきい値電圧の照射後の変化を示す。しきい値電圧は照射後，室温ではまったく回復しないことが分かる。このことから，線量率効果はきわめて少ないと考えられるが，一方，Fig.3.44の 3×10^5 R以上の低線量率照射で ΔV_{th} が高線量率照射とずれ始める傾向があること，1×10^6 R／h の高線量率照射では，ΔI_{DSS} が低線量率照射より増加速度が著しく速いことから線量率効果が認められる。特に，前者の ΔV_{th} に関しては，測定点が少ないので，低線量率でより長時間の照射を行って確かめる必要があろう。

3.3.4　トランジスタの電子線とγ線の照射効果の比較

電子線と ^{60}Coγ線との照射効果の比較にあたって考慮すべき問題として，電子線とγ線の物質透過性の違いがある。照射に用いた各トランジスタは，キャンパッケージされている。そこで，各トランジスタのカバー材の材質（主に，Zn，Fe等）と厚み（0.3mm程度）から，あらかじめ求めてある電子線加速器のDepth Dose Curveを使って各トランジスタのカバー材で遮蔽される電子線線量を求めた。各トランジスタに対する電子線照射線量は，窓下の空気中の照射線量から上述の遮蔽線量を差し引いたものとした。なお，γ線照射線量は上述のようなカバー材による遮蔽効果は考慮していない。また，電子線とγ線の照射効果の比較において，カバー材から放出される散乱線の影響は考慮していない。

なお，以下に述べる電子線とγ線の照射効果の比較では，すでに述べたように電子線照射はバイアスをかけずに照射を行っているので，比較として示したγ線照射においてもバイアス無の結果を用いた。

Fig.3.55～Fig.3.60に，2SB603の電子線照射効果をγ線照射の 1×10^3 R／h と 1×10^6 R／h の照射結果と併せて示す。トランジスタの h_{FE}／h_{FEO}, ΔI_{CBO}, ΔI_{EBO}, $V_{BE(sat)}$, t_{on}, t_f, t_{stg} における電子線照射（1MeV）とγ線（1.17MeVと1.33MeVが1：1）照射効果を比較すると，いずれも電子線照射よりもγ線照射の方が同一線量に対して，トランジスタの劣化（または照射効果）が大きい。また，電子線のエネルギー1MeVと2MeV照射において明らかに照射効果の差異が認められる。

一般に1MeV程度の電子線やγ線の照射効果は放射線と物質とのコンプトン散乱によって生

ずるとされており，照射効果に本質的な差異があるとは考えられない。電子線照射による温度上昇は，加速器窓の冷却風のため固定照射は1400秒においてもトランジスタの表面部ではとんど認められなかった。また，電子線とγ線のトランジスタ実作動部における線量の違いもこの厚さが数μmであることを考えるときわめて小さいと考えられる。

以上のことから，2SB603に認められる電子線とγ線の照射効果の差異の現れる理由の1つとして線量率効果が考えられる。Table 3.5に示すように，電子線照射と1×10^6R／hのγ線照射では線量率で約40倍電子線照射の方が高い。すなわち、1MeV電子線照射の結果は，γ線の線量率効果の延長上にあり，線量率が4×10^7R／hに相当すると考えられる。

Fig. 3.61～Fig. 3.63に，2SC764の電子線照射効果をγ線照射の1×10^3R／hと1×10^6R／hの照射効果と比較して示す。2SC764は耐放射線性がきわめて高く，従って，電子線とγ線の照射効果の違い及び電子線照射における1MeV及び2MeVの電子線エネルギーの違いもまったく認められない。これは前述したように，このトランジスタの耐放射線性がきわめて優れていることによると考えられる。

Fig. 3.64～Fig. 3.66に，2SK458の電子線とγ線の照射効果を比較して示す。電子線1MeVとγ線の照射効果を比較すると電子線照射の方が2SK458の劣化が少ない。また，1MeV電子線と2MeV電子線の照射効果の比較では，1MeV電子線の方が照射効果が小さい。2SK458では，γ線照射において線量率効果がほとんど認められなかったことから，2SB603で述べたように，線量率効果によって1MeV電子線の照射効果が少ないと考えることはできない。従って，2SK458では電子線とγ線とにおいて照射効果に違いがあると考えられる。先のトランジスタのγ線照射効果の項で述べたように，2SB603と2SK458の照射劣化機構は同様で，酸化膜／半導体の界面準位の生成，酸化膜中の正孔の蓄積などと考えられており，従って，2SK458と2SB603において電子線とγ線の照射効果が異なることについては，今後の検討を必要とする。

Table 3.1 Electrical Characteristics of Transistor

PNP Silicon Triple Diffused Transistor High Voltage Low Speed Switching(2SB603)

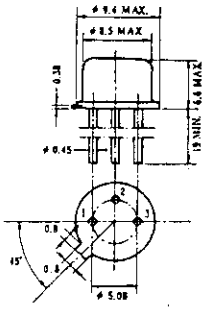
FEATURES

- Low Collecter Saturation Voltage; $V_{CE(sat)}$:-1.0 V MAX.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta=25°C)

Term	Symbol	Measurement Condition	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Collecter Cutoff Current	I_{CBO}	V_{CB}=-500 V, I_E=0			-10	μA
Emitter Cutoff Current	I_{EBO}	V_{BE}=-5.0 V, I_C=0			-10	μA
DC Current Gain	h_{FE1}	V_{CE}=-5.0 V, I_C=-10 mA	50			
DC Current Gain	h_{FE2}	V_{CE}=-5.0 V, I_C=-0.1 A	50			
Collecter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	I_C=-60 mA, I_B=-2 mA			-1.0	V
Base Saturation Voltage	$V_{BE(sat)}$	I_C=-60 mA, I_B=-2 mA			-1.5	V
Turn on Time	t_{on}	I_C=-0.1 A, R_L=1.5 K I_{B1}=I_{B2}=-10mA, V_{CC}=-150 V (Fig. 3.3)		1.0		μs
Strage Time	t_{stg}			6.0		μs
Fall Time	t_f			1.0		μs

PACKAGE DIMENSIONS (Unit : mm)



1. Emitter
2. Base
3. Collector(Case)

EIAJ : TC-5, TB-5B
JEDEC : TO-205MD(TO-39)
IEC : C4, B4B

NPN Silicon Epitaxial Transistor High Speed Switchihg,High Frequence Amplifier(2SC764)

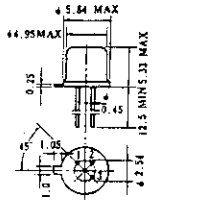
FEATURES

- High Speed Switching; ton:12 ns MAX, t_{off}:18 ns MAX.
- Low Collector Saturation Voltage; $V_{CE(sat)}$:0.25 V MAX.
- High Gain Bandwidth Product; f_T :500 MHz MIN.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta=25°C)

Term	Symbol	Measurement Condition	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Collecter Cutoff Current	I_{CBO}	V_{CB}=40 V, I_E=0			0.1	μA
Emitter Cutoff Current	I_{EBO}	V_{EB}=3.0 V, I_C=0			0.1	μA
DC Current Gain	h_{FE}	V_{CE}=1.0 V, I_C=10 mA	40	100	200	
Collecter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	I_C=10 mA, I_B=1.0 mA		0.15	0.25	V
Base Saturation Voltage	$V_{BE(sat)}$	I_C=10 mA, I_B=1.0 mA		0.80	0.85	V
Close-Cricuit Small-Signal Foward Current Gain	h_{fe}	V_{CE}=10 V, I_E=-10 mA f=270 Hz		80		
Gain Bandwidth Product	f_T	V_{CE}=10 V, I_E=-10 mA	500	750		MHz
Output Capasitance	C_{ob}	V_{CB}=5.0 V, I_E=0, f=1.0 MHz		1.9	4.0	pF
Collector to Base Constant	Cc.rd'b	V_{CE}=10 V, I_E=-10 mA f=80 MHz			100	ps
Turn on Time	t_{on}	VBB=-3 V, VBB=+120 V		8.0	12	ns
Strage Time	t_{stg}	Vin=+150 V, Vin=-15 V		6.0	13	ns
Turn off Time	t_{off}	(Fig. 3.3)		12	18	ns

PACKAGE DIMENSIONS (Unit : mm)



1. Emitter
2. Base
3. Collector(Case)

EIAJ : TC-7, TB-8C
JEDEC : TO-206MA(TO-18)
IEC : C7, B1I

N-Channel Silicon Power MOS FET Switching(2SK458)

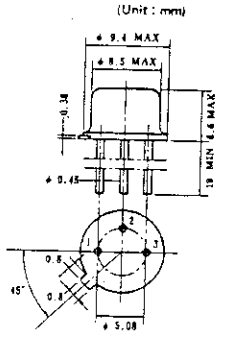
FEATURES

- Low ON Drain Resistance; $R_{DS(ON)} \leqq 1.5\ \Omega$ MAX.
- High Speed Switching; t_{on}:30 ns, t_{off}:40 ns TYP.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta=25°C)

Term	Symbol	Measurement Condition	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Drain Current	I_{DSS}	V_{DS}=100 V, V_{GS}=0			50	μA
Gate Cutoff Current	I_{GSS}	V_{GS}=±20 V, V_{DS}=0			100	nA
Gate to Source Cutoff Voltage	$V_{GS(off)}$	V_{DS}=10 V, I_D=1 mA	1	2.3	5	V
Forward Transfer Admitance	y_{fs}	V_{DS}=10 V, I_D=0.5 A	0.5	0.6		S
ON Drain Resistance	$R_{DS(ON)}$	V_{GS}=10 V, I_D=0.5 A			1.5	Ω
Input Capasitance	C_{iss}	V_{DS}=10 V		300		pF
Output Capasitance	C_{oss}	V_{GS}=0		100		pF
Feed Back Capasitance	C_{rss}	f=1 MHz		50		pF
ON Delay Time	$t_{d(on)}$	I_D=0.5 A, $V_{GS(on)}$=10 V		10		ns
Rise Time	t_r	$V_{CC} \fallingdotseq$ 50 V, R_L=100 Ω		20		ns
OFF Delay Time	$t_{d(off)}$	R_{in}=10 Ω		20		ns
Fall Time	t_f	(Fig. 3.3)		20		ns

PACKAGE DIMENSIONS (Unit : mm)



1. Source
2. Gate
3. Drain(Case)

EIAJ : TC-5, TB-5B
JEDEC : TO-205MD(TO-39)
IEC : C4, B4B

Table 3.2 Heat Treatmet Condition Before Irradiation

Transistor	Heat Treatment
2SB603	175°C x 3h (Bias unsupplied)
2SC764	175°C x 3h (〃)
2SK458	150°C x 3h (〃)

Table 3.3 Radiation Source and Irradiation Facilities

Test facility	No.2 cell, Food Irradiation Facility*)	No.1 cell, Irradiation Facility of Radiation Engineering*)	No.2 cell, Irradiation Facility of Radiation Engineering*)
Radiation source	186337ci ^{60}Co	830ci ^{60}Co	20ci ^{60}Co
Arrangement of source	Plate	Cylindrical	Cylindrical
Exposure rate	1×10^{6}R/h 1×10^{5}R/h	1×10^{3}R/h	1×10^{2}R/h
Distance from source to specimens	14cm 112cm	100cm	51cm

*) JAERI, Takasaki Radiation Chemistry

Table 3.4 ^{60}Co-γ ray Irradiation Conditions of Transistor

(a) 2SB603

Exposure rate \ Exposure	1×10⁴R	3×10⁴R	1×10⁵R	3×10⁵R	1×10⁶R	1×10⁷R	1×10⁸R
1.0×10⁶R/h	Bias on,off	Bias on,off	Bias on,off	Bias on	Bias on	Bias on	Bias on
1.0×10⁵R/h	Bias on,off	Bias on,off	Bias on,off	Bias on	Bias on		
1.0×10³R/h	Bias on,off	Bias on,off	Bias on,off	Bias on	Bias on		
1.0×10²R/h	Bias on,off	Bias on,off	Bias on,off	Bias on			

(b) 2SC764

Exposure rate \ Exposure	1×10⁴R	3×10⁴R	1×10⁵R	3×10⁵R	1×10⁶R	1×10⁷R	1×10⁸R
1.0×10⁶R/h	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on,off	Bias on,off
1.0×10⁵R/h	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on	Bias on,off		
1.0×10³R/h	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on	Bias on,off		
1.0×10²R/h	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on			

(c) 2SK458

Exposure rate \ Exposure	1×10³R	3×10³R	1×10⁴R	3×10⁴R	1×10⁵R	3×10⁵R	1×10⁶R
1.0×10⁶R/h			Bias on,off	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on
1.0×10⁵R/h	Bias on	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on
1.0×10³R/h	Bias on	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on
1.0×10²R/h	Bias on	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	Bias on	Bias on,off	

(d) 2SB603 (Supplementary irradiation)

Exposure rate \ Exposure	3×10³R	6×10³R	1.3×10⁴R	6×10⁴R			
1.0×10⁵R/h		Bias on	Bias on	Bias on			
1.0×10³R/h	Bias on						
1.0×10²R/h	Bias on						

Table 3.5 Electron-beam Irradiation Conditions of Transistor

(a) 2SB603 and 2SK458

i) Conveyor use

Exposure (R)	Acceleration voltage (MV)	Beam current (mA)	Distance *1) (cm)	Conveyor speed (m/min)	Number of pass	Exposure/pass (R/pass)	Exposure rate (R/S)
0.92×10^{4}	1.0	0.1	30	10	1	0.92×10^{4}	0.96×10^{4}
1.00×10^{4}	2.0	0.1	30	10	1	1.00×10^{4}	1.00×10^{4}
1.10×10^{5}	1.0	0.1	30	5	6	1.84×10^{4}	0.96×10^{4}
1.00×10^{5}	2.0	0.1	30	5	5	2.00×10^{4}	1.00×10^{4}

ii) Fixed irradiation

Exposure (R)	Acceleration voltag (MV)	Beam current (mA)	Distance *1) (cm)	Irradiation time (S)	Exposure rate (R/S)
1.10×10^{6}	1.0	0.1	30	140	0.78×10^{4}
1.40×10^{6}	2.0	0.1	30	100	1.40×10^{4}
1.10×10^{7}	1.0	0.1	30	1400	0.78×10^{4}

(b) 2SC764

i) Conveyor use

Exposure (R)	Acceleration voltage (MV)	Beam current (mA)	Distance *1) (cm)	Conveyor speed (m/min)	Number of pass	Exposure/pass (R/pass)	Exposure rate (R/S)
1.10×10^{4}	1.0	0.1	30	10	1	1.10×10^{4}	1.15×10^{4}
0.95×10^{4}	2.0	0.1	30	10	1	0.95×10^{4}	1.30×10^{4}
1.10×10^{5}	1.0	0.1	30	5	5	2.20×10^{4}	1.15×10^{4}
1.14×10^{5}	2.0	0.1	30	5	5	1.90×10^{4}	1.30×10^{4}

ii) Fixed irradiation

Exposure (R)	Acceleration voltage (MV)	Beam current (mA)	Distance *1) (cm)	Irradiation time (S)	Exposure rate (R/S)
1.1×10^{6}	1.0	0.1	30	120	0.95×10^{4}
1.3×10^{6}	2.0	0.1	30	100	1.30×10^{4}
1.1×10^{7}	1.0	0.1	30	1200	0.95×10^{4}

*1 Distance from beam window to specimen

Table 3.6 Measurement Parameters of Transistor

a) 2SB603 (Bi-polar Transistor)

Measurement Parameter	Sweep range			INTEG TIME	Remarks
	START	STOP	STEP		
hFE-IC	0.00E+00	-7.00E-01	1.00E-02	SHORT	IE=0.0 VCE=-5.0E+00
ICBO-VCE	0.00E+00	-1.00E+02	-1.00E+00	LONG	IB=0.0
IEBO-VBE	0.00E+00	-5.00E+00	-5.00E-02	LONG	IB=0.0
IC-VBE (sat) VCE (sat)	0.00E+00	-1.00E-01	-1.00E-03	SHORT	IE=0.0

b) 2SC764 (Bi-polar Transistor)

Measurement Parameter	Sweep range			INTEG TIME	Remarks
hFE-IC	2.00E-01	9.00E-01	1.00E-02	SHORT	IE=0.0 VCE=1.0E+00
ICBO-VCE	0.00E+01	4.00E+01	5.00E-01	LONG	IB=0.0
IEBO-VBE	0.00E+00	5.00E+00	5.00E-02	LONGE	IB=0.0
IC-VBE (sat)	0.00E+00	9.00E-02	1.00E-03	SHORT	IE=0.0

c) 2SK458 (Power MOS Transistor)

Measurement Parameter	Sweep range			INTEG TIME	Remarks
	START	STOP	STEP		
ID-VDS	-3.00E+00	7.00E+00	1.00E-01	SHORT	IS=0.0 VD=5.00E-02
ID-VGS	0.00E+00	1.00E-01	1.00E-03	LONG	IS=0.0 VG=1.00E+01
IDSS-VDS	0.00E+00	1.00E+02	1.00E+00	LONG	IS=0.0 IG=0.0
IGSS-VGS	-2.00E+01	2.00E+01	5.00E-01	LONG	IS=0.0 ID=0.0

Table 3.7 Exposure Rate Effects of γ-ray Irradiation on 2SB603.

	Forward current and DC current gain	Cutt off current	Saturation voltage	Switching time
	I_B, I_C, h_{FE}	$\Delta I_{CBO}, \Delta I_{EBO}$	$V_{BE(sat)}, V_{CE(sat)}$	t_{on}, t_{sto}, t_f
Effect of Exposure and Exposure rate (Bias Supply)	• Base current increases with increasing exposure. • Collector current is independent on exposure. • Below $1x10^5$R exposure, decrease of h_{FE} in the lower exposure rate is larger than that in the higher exposure rate. • Above $1x10^5$R exposure in the lower exposure rate, h_{FE} shows recovery.	• Below $1x10^5$R exposure, both increments of I_{CBO} and I_{EBO} are larger in the lower exposure rate than those in the higher exposure rate, in addition, both increments show the maximum at $1x10^5$R. • In the higher exposure rate, both increment of I_{CBO} and I_{EBO} increase with increasing exposure.	• V_{BE} is independent on exposure and exposure rate. • V_{CE} saturates over $1x10^5$R in the lower exposure rate, and increases rapidly around $1x10^6$R in the higher exposure rate.	• Both t_{on} and t_f are independent on exposure and exposure rate until $1x10^6$R. • t_{sto} decreases with increasing exposure irrespective of exposure rate.
Effect of Bias	• Effect of bias on h_{FE} is small. • In the higher exposure rate, degradation of electrical properties is larger in the case of bias supply than that in bias unsupply.	• Effect of bias on increm-increments of I_{CBO} and I_{EBO} are small. • In the higher exposure rate,degradation is larger in the case of bias supply than that in bias unsupply.	• Effect of bias on V_{BE} and V_{CE} is small except 10^2R.	• t_{on} shows apparently effect of bias, but t_f dose not. • In the lower exposure rate, t_{sto} change is small in the case of bias supply.

Table 3.8 Comparison of Exposure Rate Effects in 2SC764 and 2SB603 Irradiated by γ-ray.

Transistor	Characteristics	Forward current and DC current gain	Cutt off current	Saturation voltage	Switching time
		I_B, I_C, h_{FE}	$\Delta I_{CBO}, \Delta I_{EBO}$	$V_{BE(sat)}, V_{CE(sat)}$	t_{on}, t_{stg}, t_f
2SB603	• PNP silicon triple diffused transistor • high voltage low speed switching.	• Increase of I_B by irradiation. • h_{FE} / h_{FE0}=0.3 0.5 at 10^5R. • Dependence on exposure rate.	• $\Delta I_{CBO}=10^{-8}$A (V_{CB}=-100V)' $\Delta I_{EBO}=10^{-9}$A (V_{BE}=-5V) • Dependence on exposure rate.	• $V_{BE(sat)}$ is independent on exposure and exposure rate until 10^6R. • $V_{CE(sat)}$ is clearly changed by irradiation, and dependent on exposure rate.	• ton increase from 10^6R. • tstg decrease from 10^4R. • tf decrease from 10^6R. • No dependence on exposure rate.
2SC764	• NPN silicon epitaxial transistor. • high speed switching, high freqnce amplifier. • Large amount of impurities is doped, because I_{CBO} and I_{EBO} of 2SC764 are larger than those of 2SB603.	• Increase of I_B by irradiation. • h_{FE} / h_{FE0}=0.5 at 10^8R. • No dependence on exposure rate.	• I_{CBO} and I_{EBO} are constant until 10^8R. • No dependence on exposure rate until 10^9R.	• No dependence on exposure rate until 10^8R.	• No dependence on exposure and exposure rate until 10^8R. (Switching times are fluctuated over the range of 10^6R.)

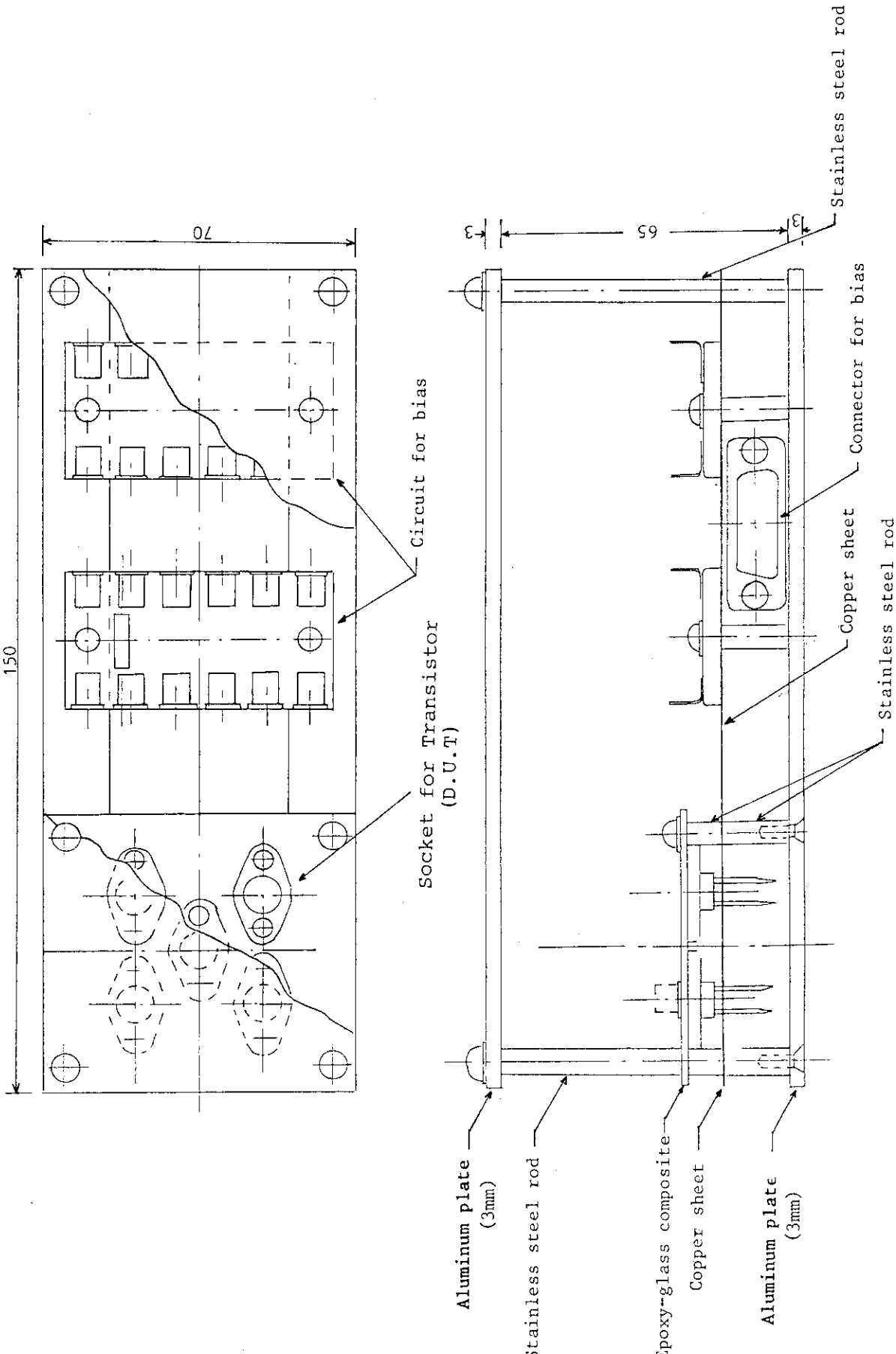


Fig. 3.1 Sample Holder for Bias Supply

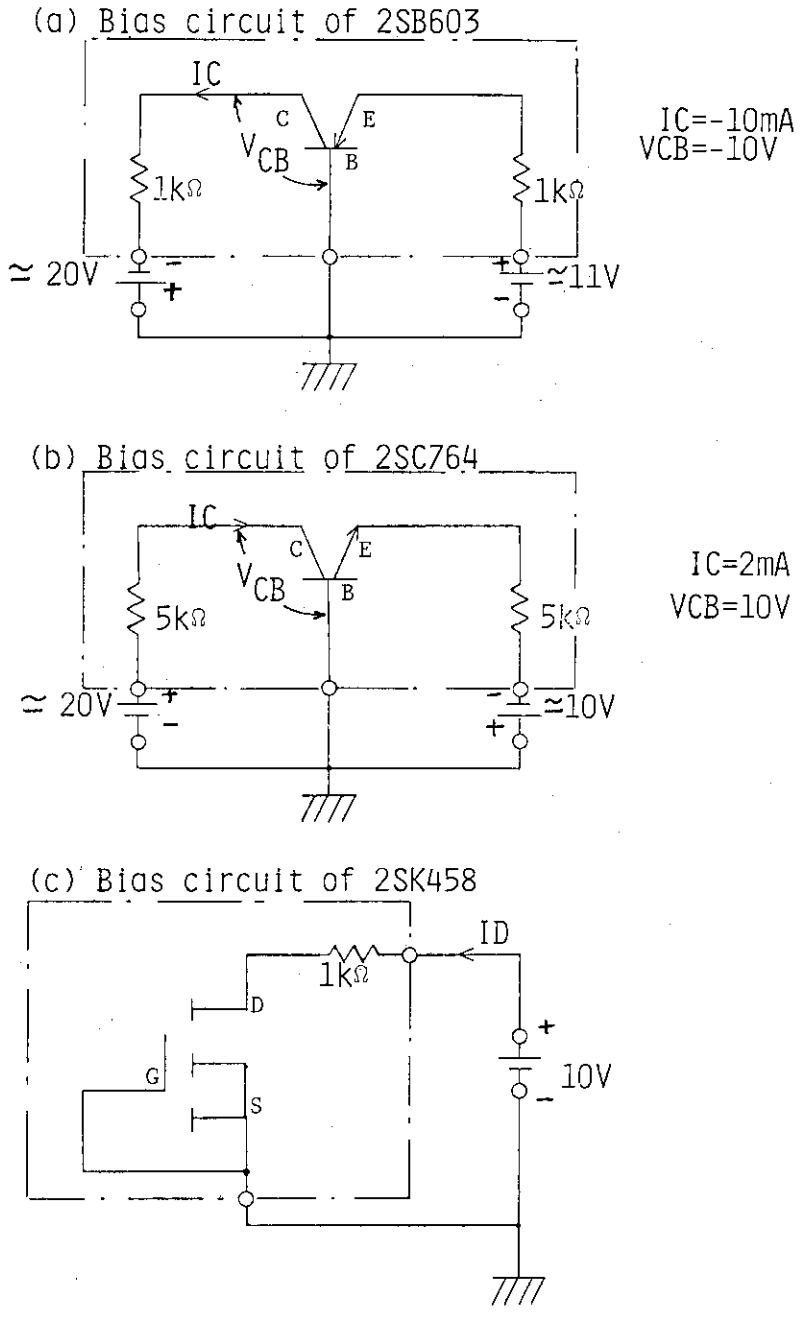
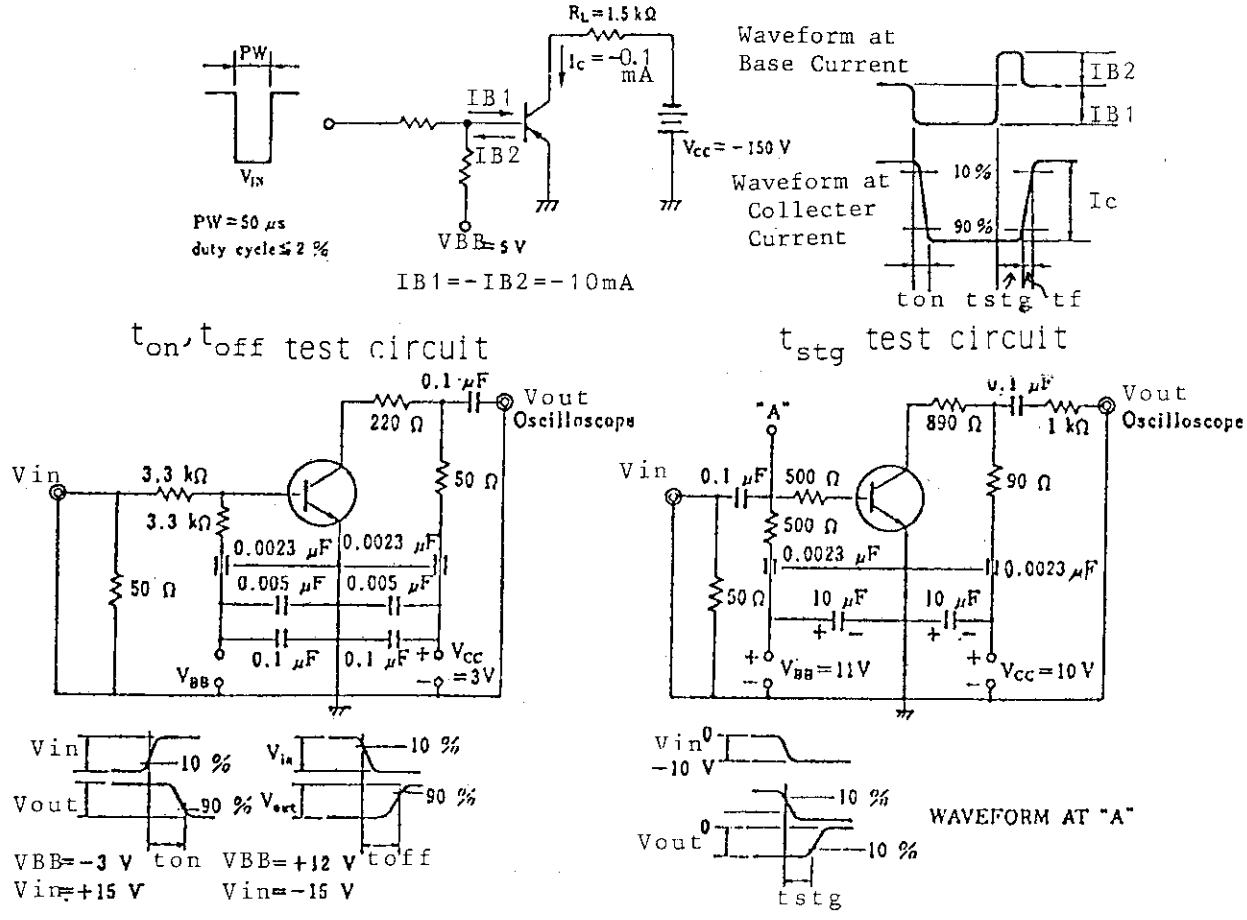


Fig. 3.2 Bias Circuits of Transistor

(a) Switching Time(t_{on}, t_{stg}, t_f) test Circuit of Bi-polar Transistor



(b) Switching Time($t_{d(on)}$, t_r, $t_{d(off)}$, t_f) test Circuit of MOS Transistor

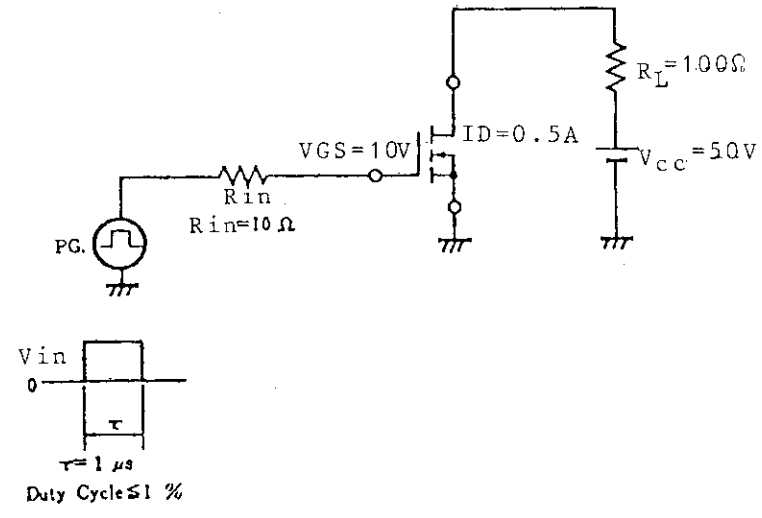


Fig. 3.3 Test Circuits of Switching Time

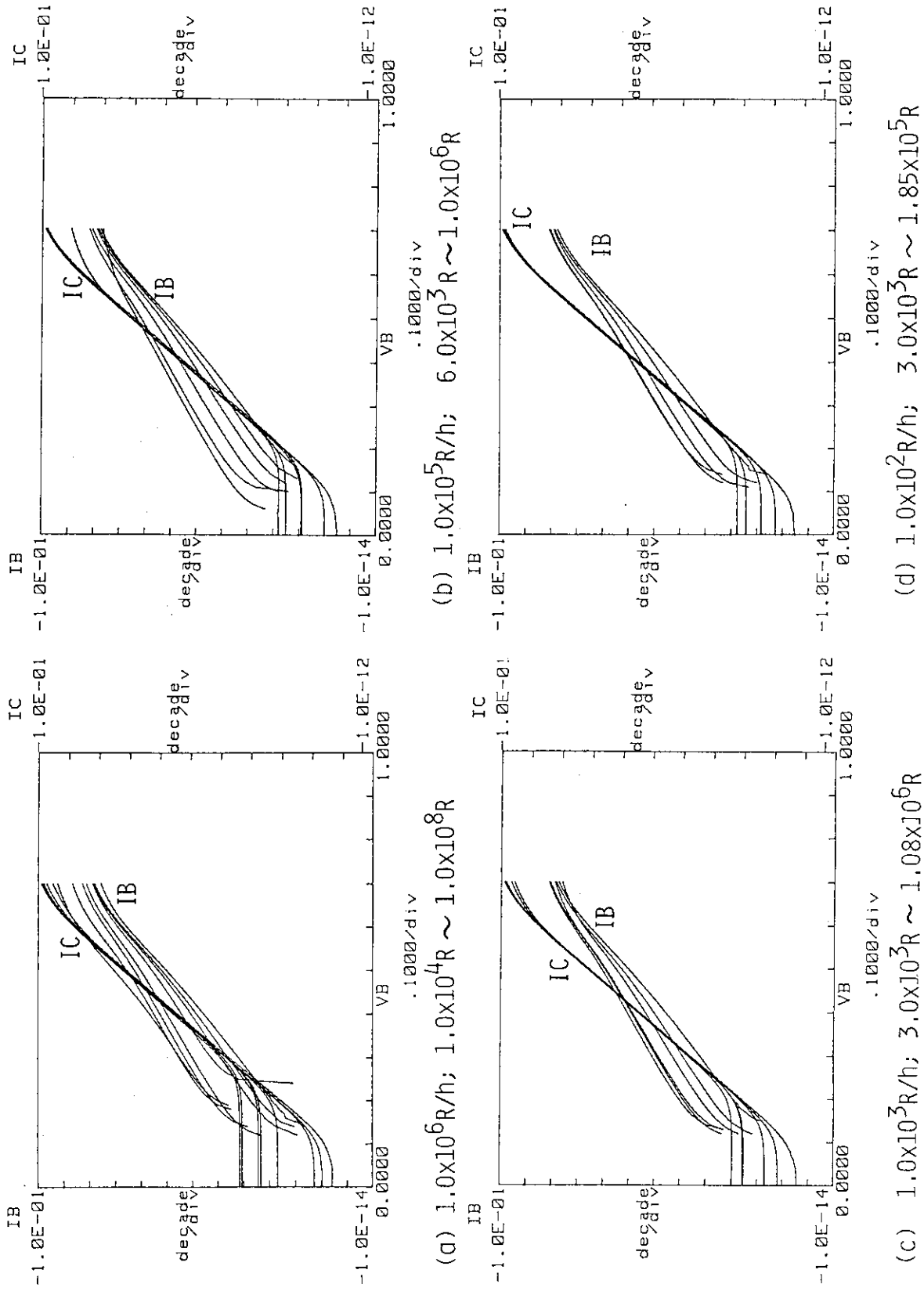


Fig. 3.4 Changes in Base Current(I_B) and Collector Current(I_C) of 2SB603 by γ-ray Irradiation.

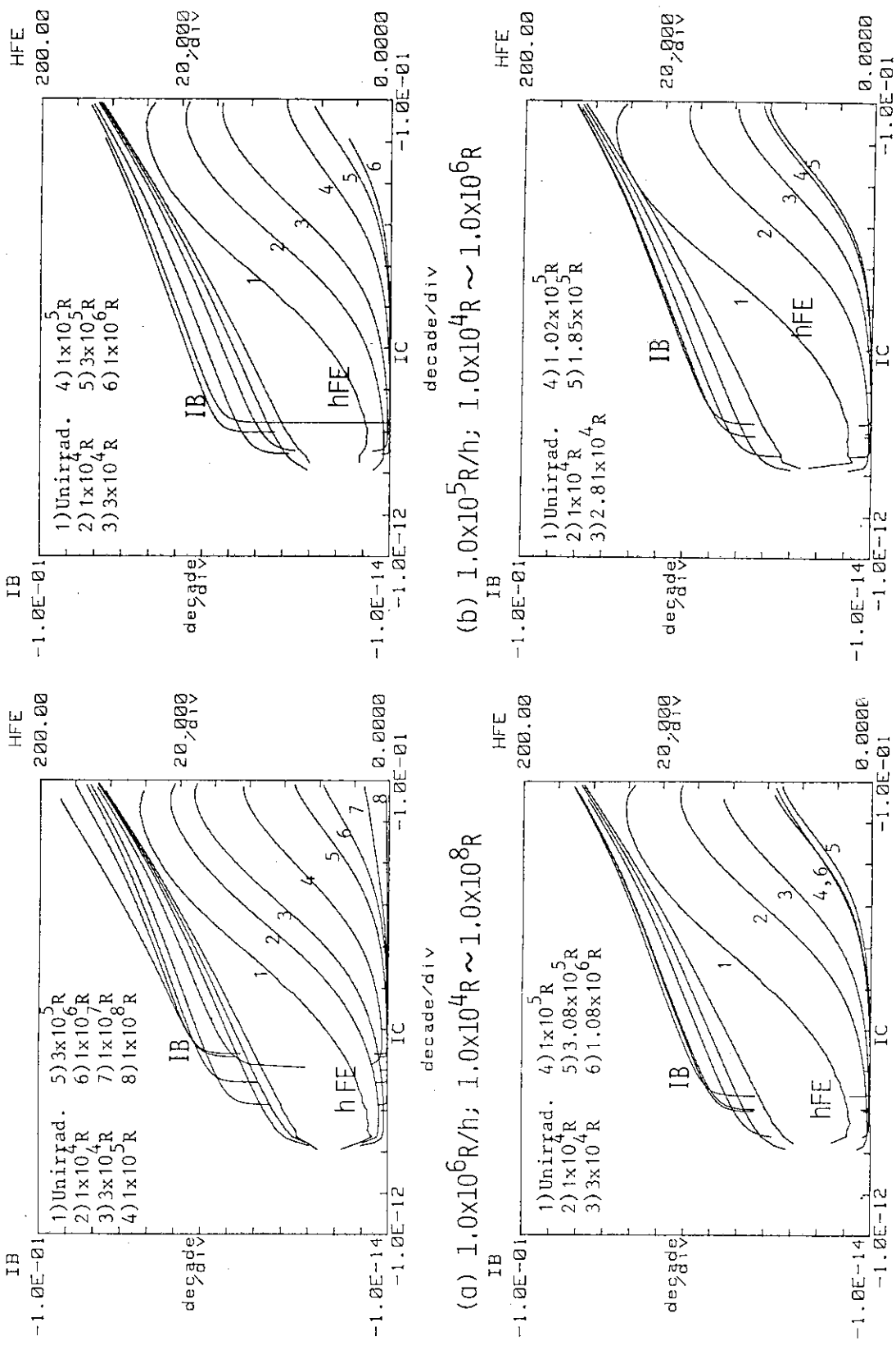
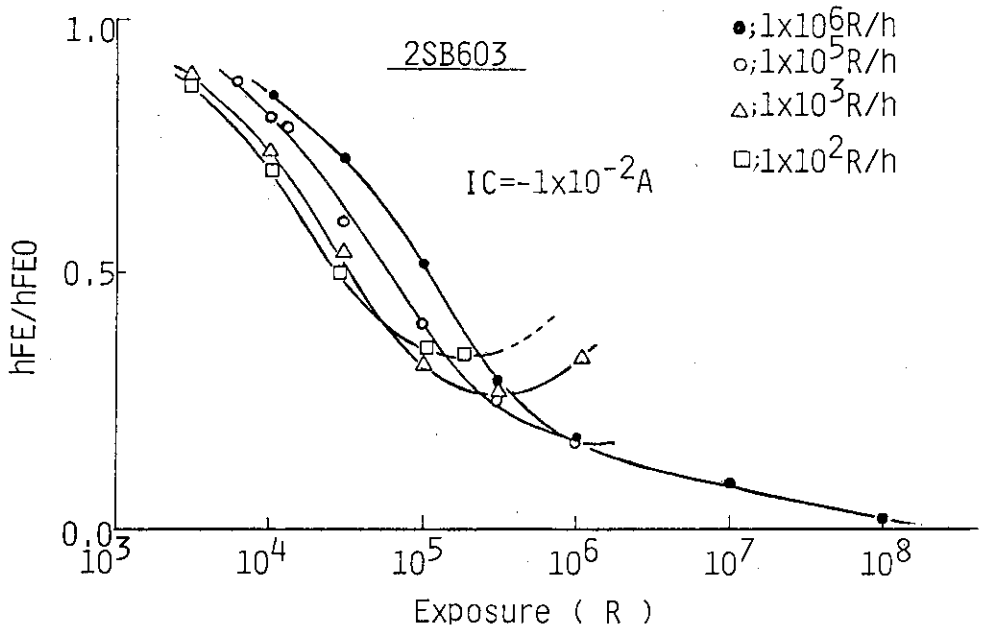
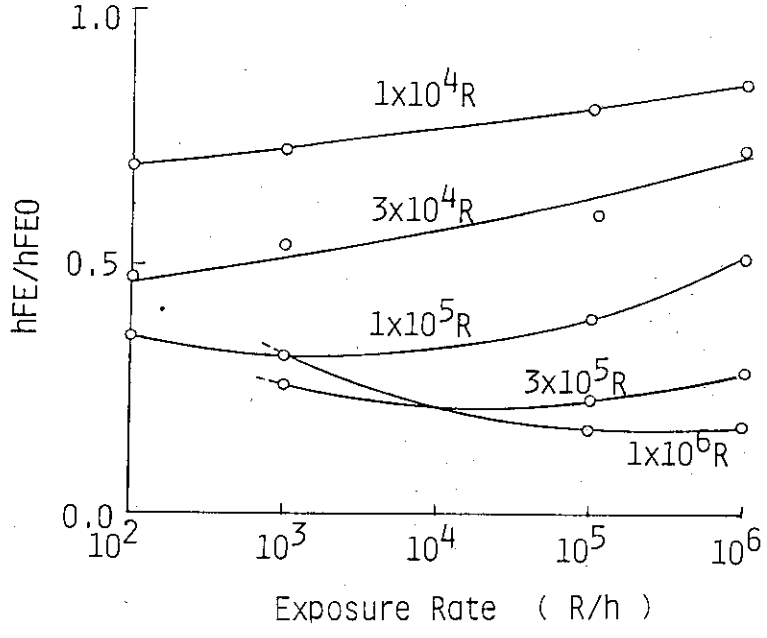


Fig. 3.5 Changes in Current Amplification Factor(h_{FE}) of 2SB603 by γ-ray Irradiation.



(a) Relationship between h_{FE} and Exposure



(b) Relationship between h_{FE} and Exposure Rate

Fig. 3.6 Relationship between h_{FE} of 2SB603 and Exposure, and between h_{FE} and Exposure Rate.
I_C=1×10^{-2}A, Bias Supplied.

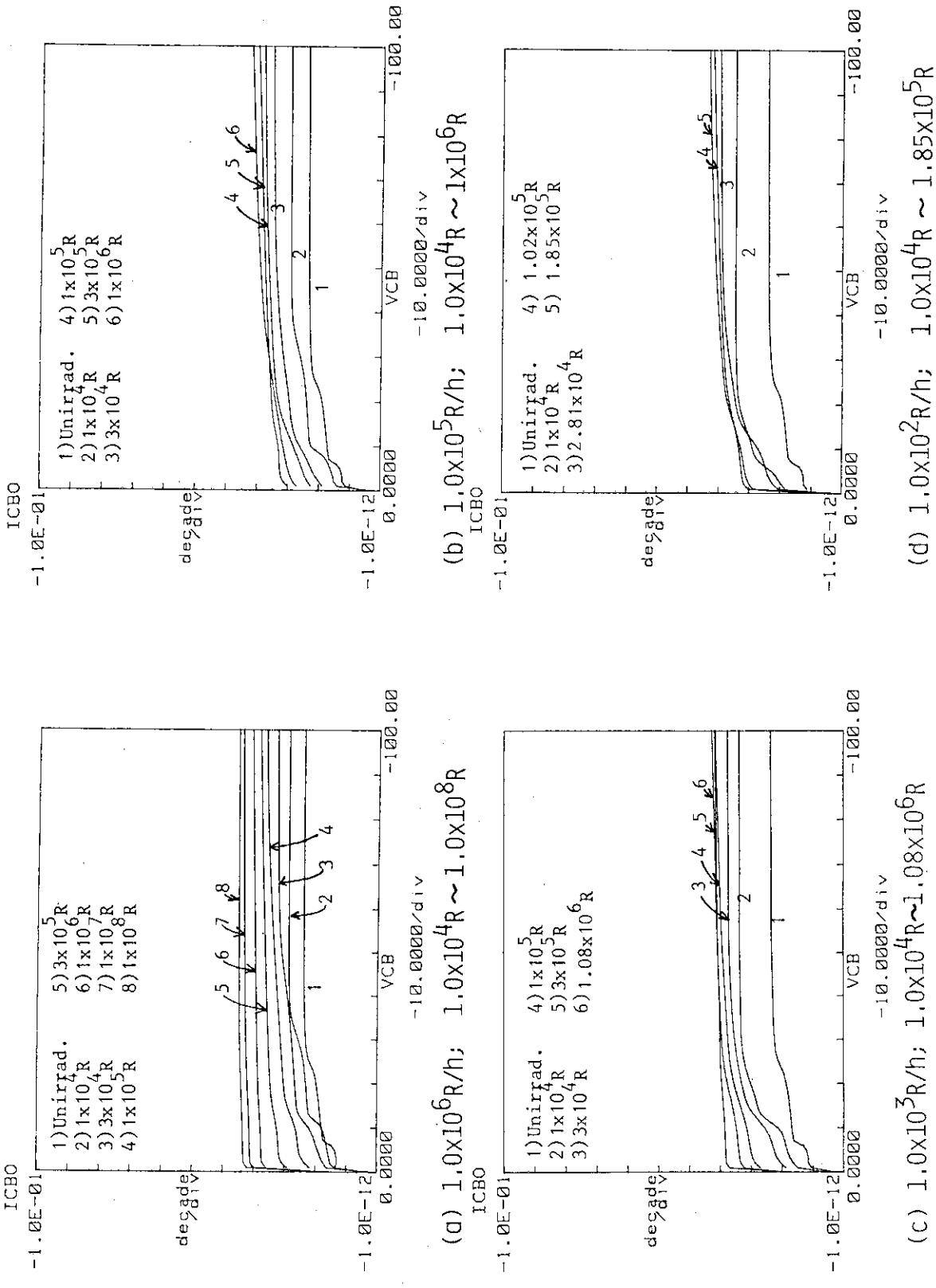


Fig. 3.7 Changes in Reverse Saturation Current(I_{CBO}) of 2SB603 by γ-ray Irradiation.

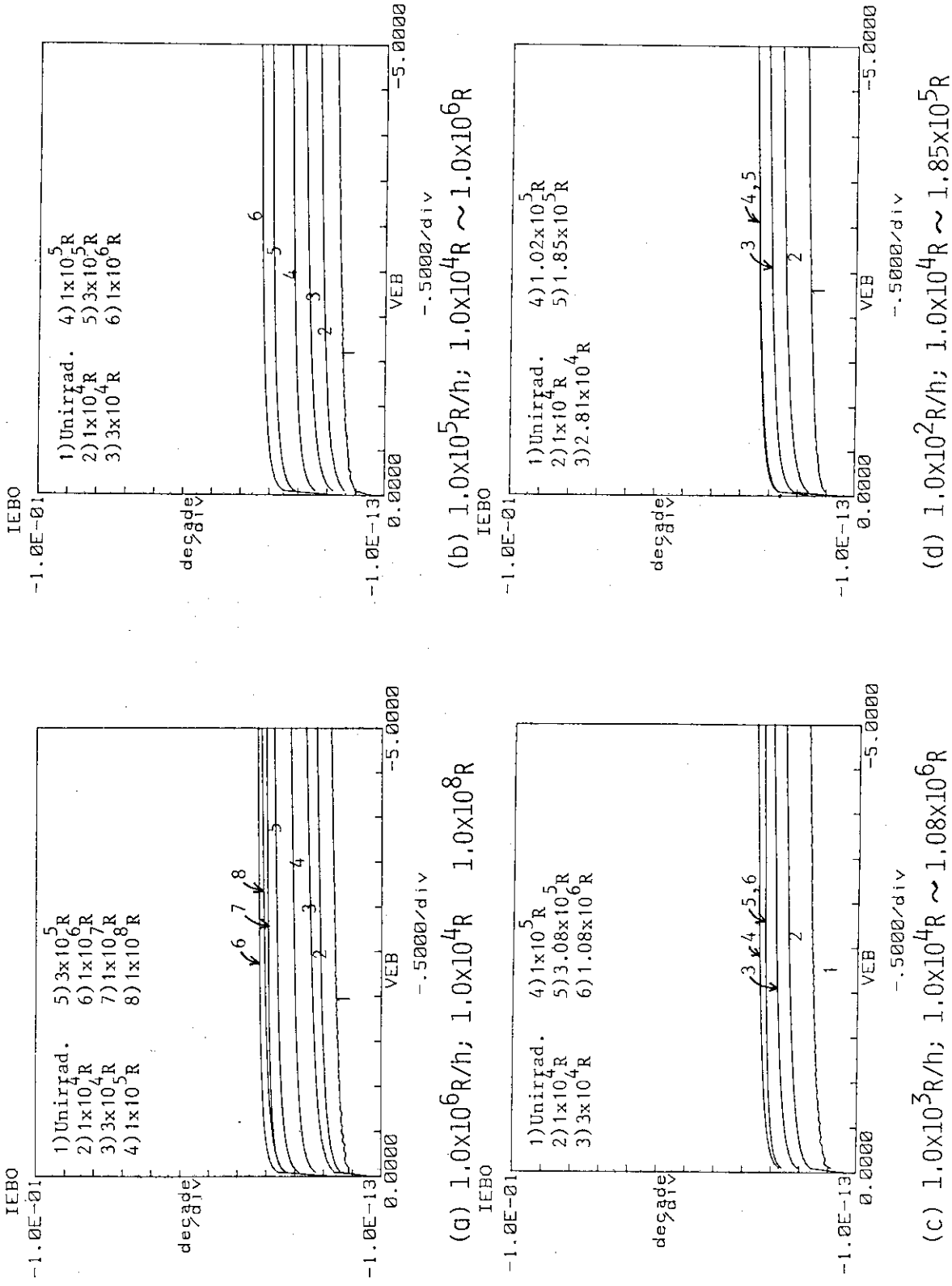
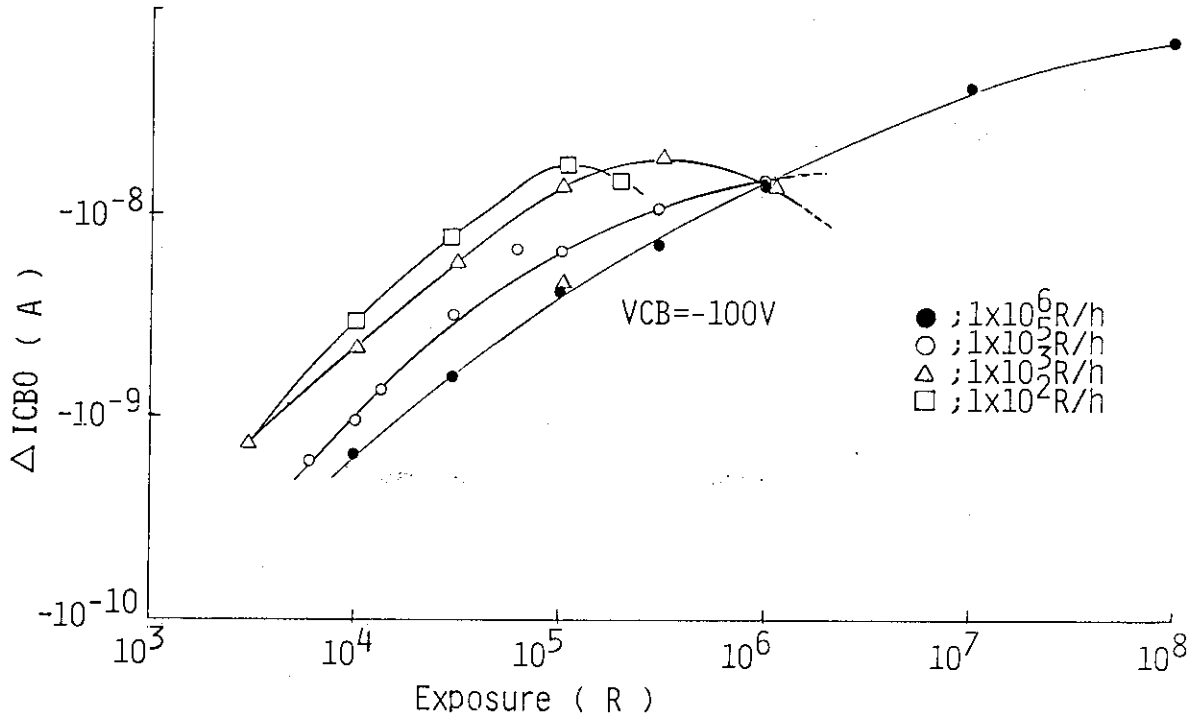
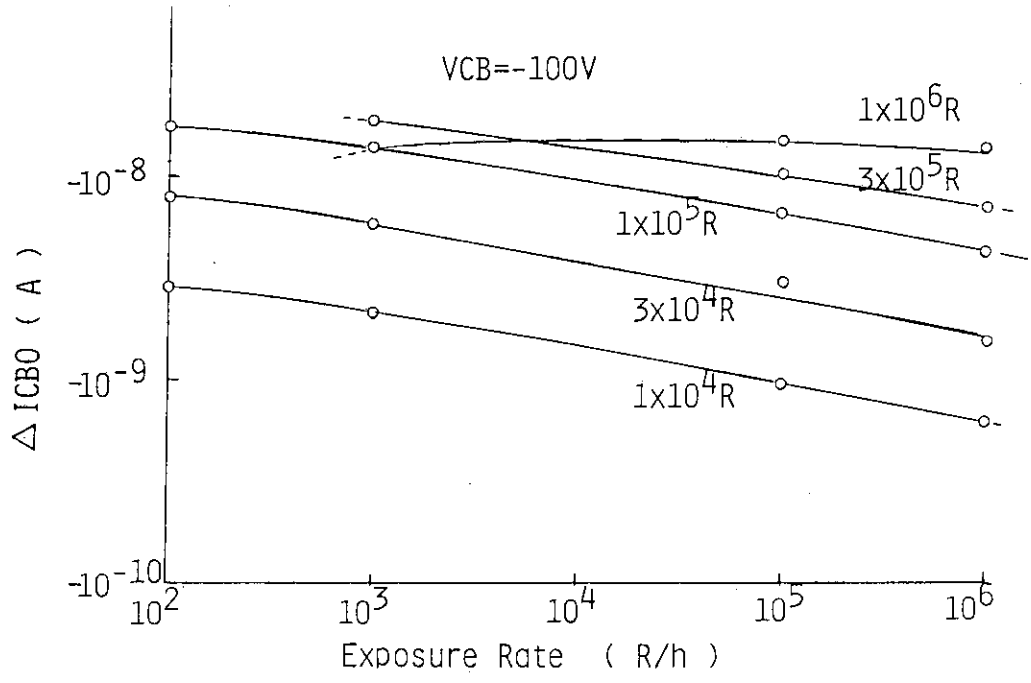


Fig. 3.8 Changes in Reverse Saturation Current (I_{EBO}) of 2SB603 by γ-ray Irradiation.

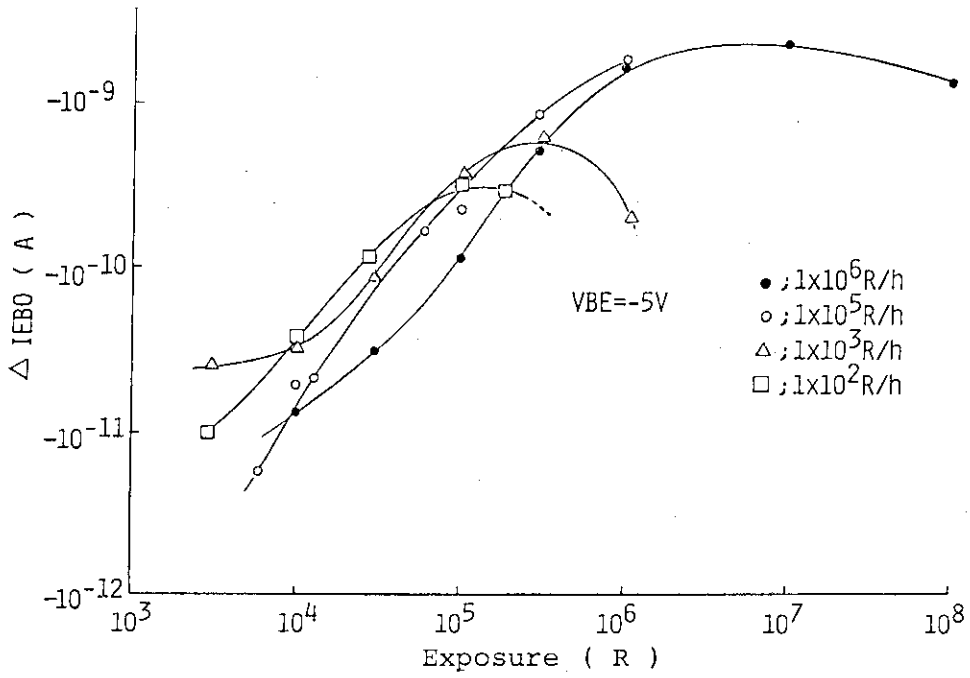


(a) Relationship between ΔI_{CBO} and Exposure

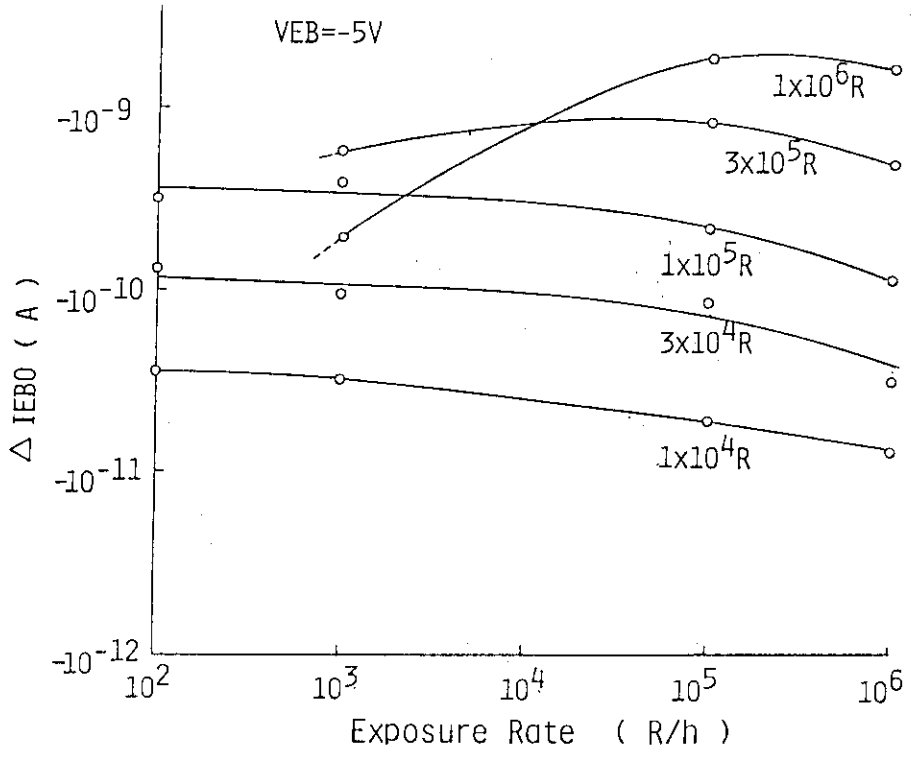


(b) Relationship between ΔI_{CBO} and Exposure Rate

Fig. 3.9 Relationship between I_{CBO} Increment(ΔI_{CBO}) of 2SB603 and Exposure, and between ΔI_{CBO} and Exposure Rate. V_{CB}=-100V, Bias Supplied.



(a) Relationship between ΔI_{EBO} and Exposure



(b) Relationship between ΔI_{EBO} and Exposure Rate

Fig. 3.10 Relationship between I_{EBO} Increment(ΔI_{EBO}) of 2SB603 and Exposure, and between ΔI_{EBO} and Exposure Rate. V_{BE}=-5V, Bias Supplied.

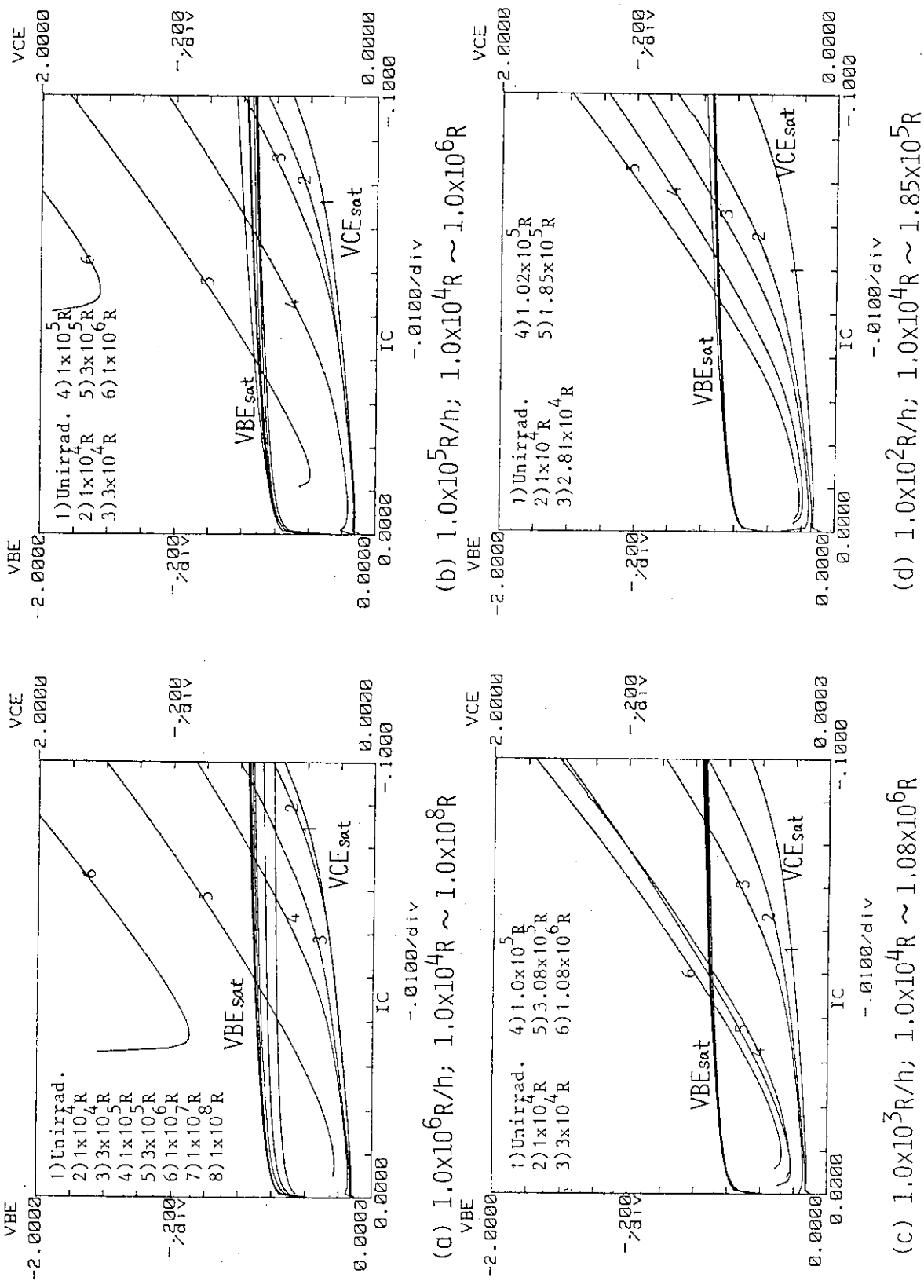
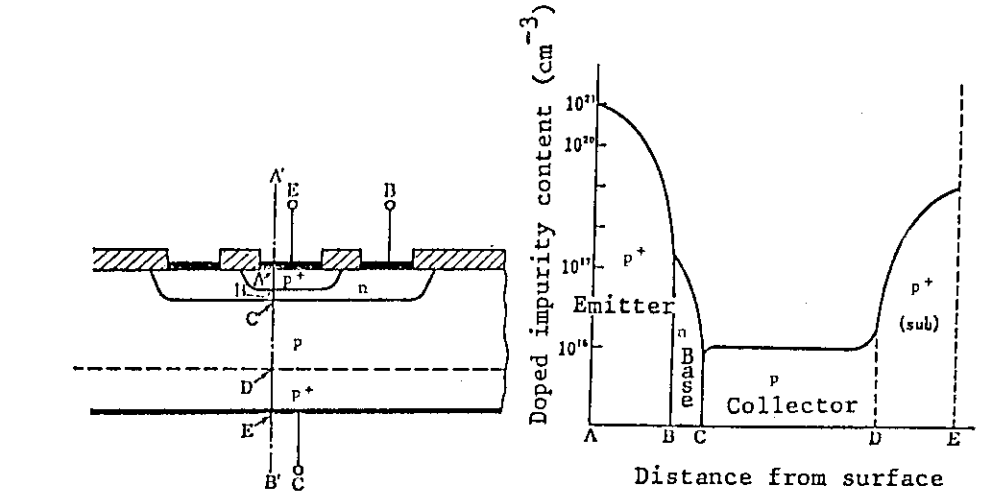


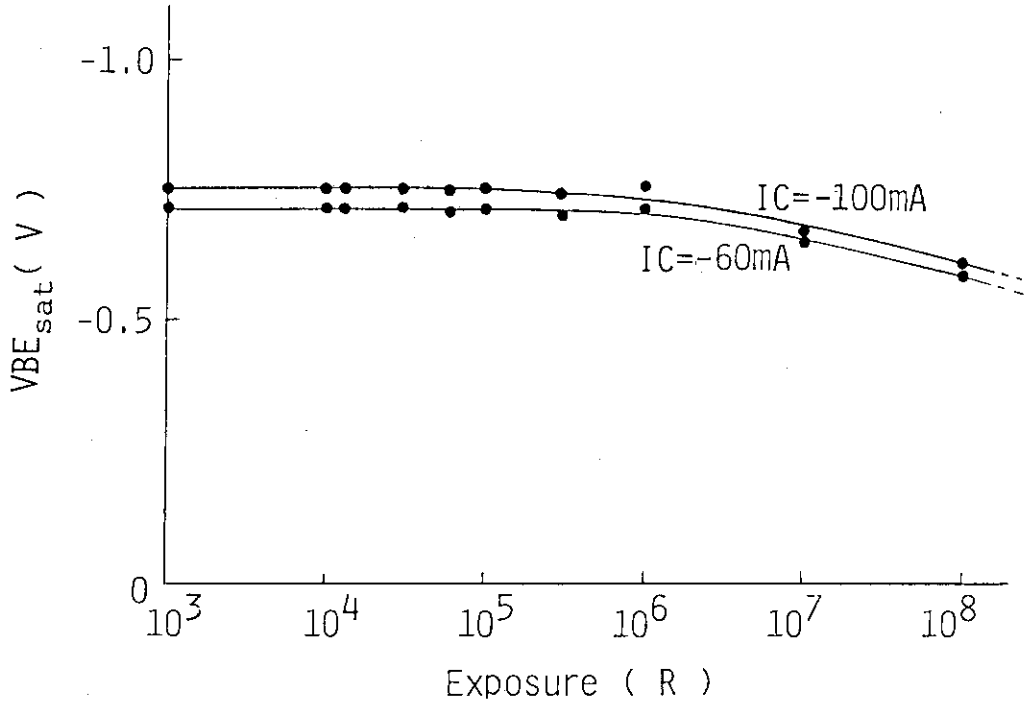
Fig. 3.11 Changes in Saturation Voltages($V_{BE(sat)}$, $V_{CE(sat)}$) of 2SB603 by γ-ray Irradiation.



(i) Schematic Cross Section of Planar Bi-polar Transistor

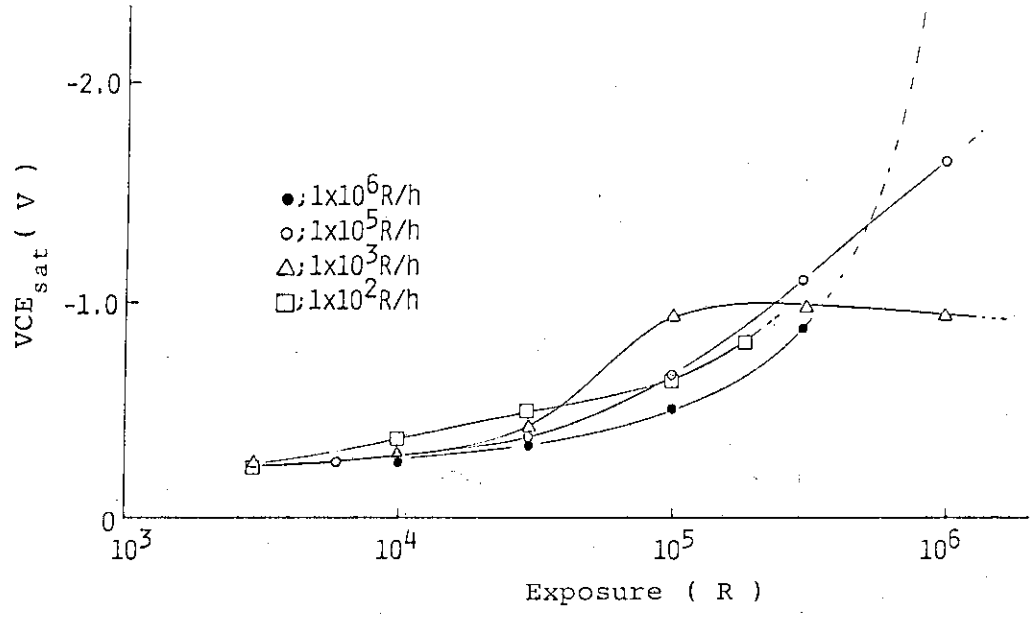
(ii) Distribution Curve of Carrier Density

(a) Structure of Bi-polar Transistor

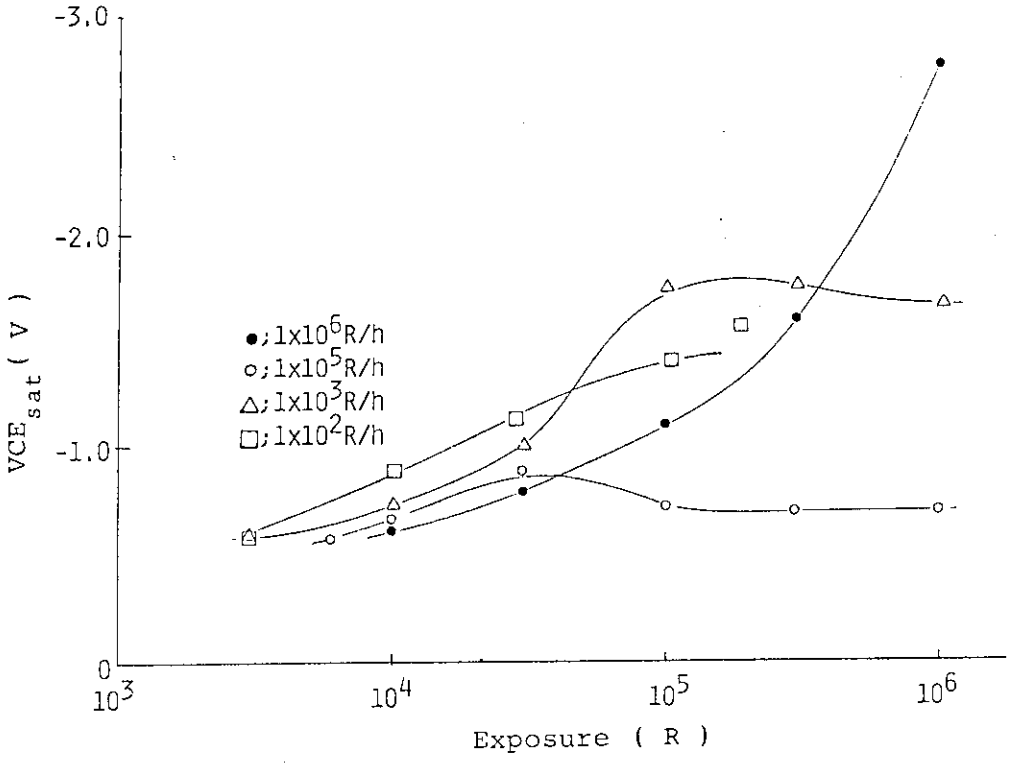


(b) $V_{BE(sat)}$ vs. Exposure at Various Exposure Rate (1×10^{2}R/h~1×10^{6}R/h)

Fig. 3.12 Relationship between Saturation Voltage($V_{BE(sat)}$) of 2SB603 and Exposure.

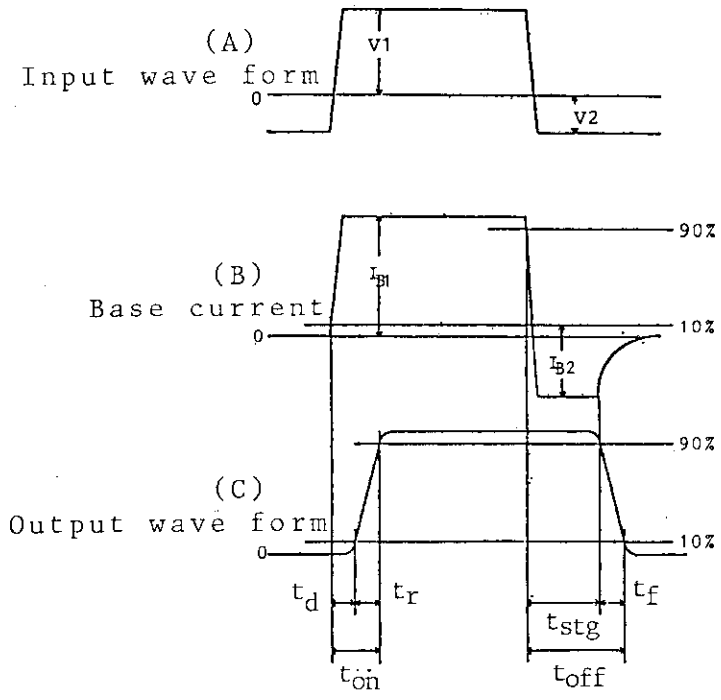


(a) IC=-60mA

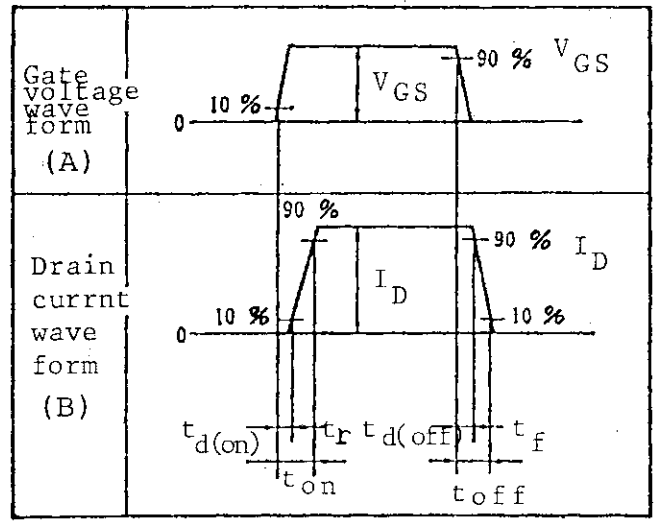


(b) IC=-100mA

Fig. 3.13 Relationship between Saturation Voltage($V_{CE(sat)}$) of 2SB603 and Exposure.



(a) Switching Time of Bi-polar Transistor



(b) Switching Time of MOS Transistor

Fig. 3.14 Switching Time of Transistor

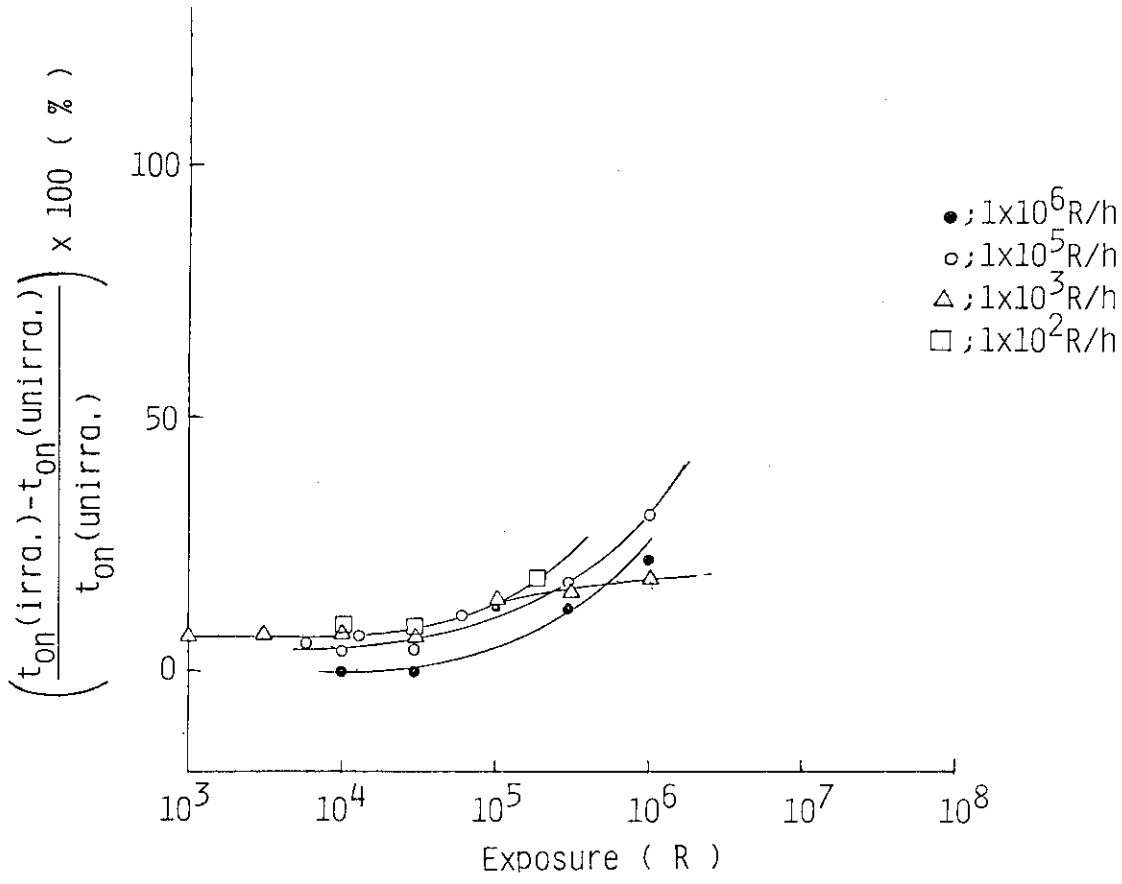


Fig. 3.15 Relationship between Turn-on Time(t_{on}) of 2SB603 and Exposure.

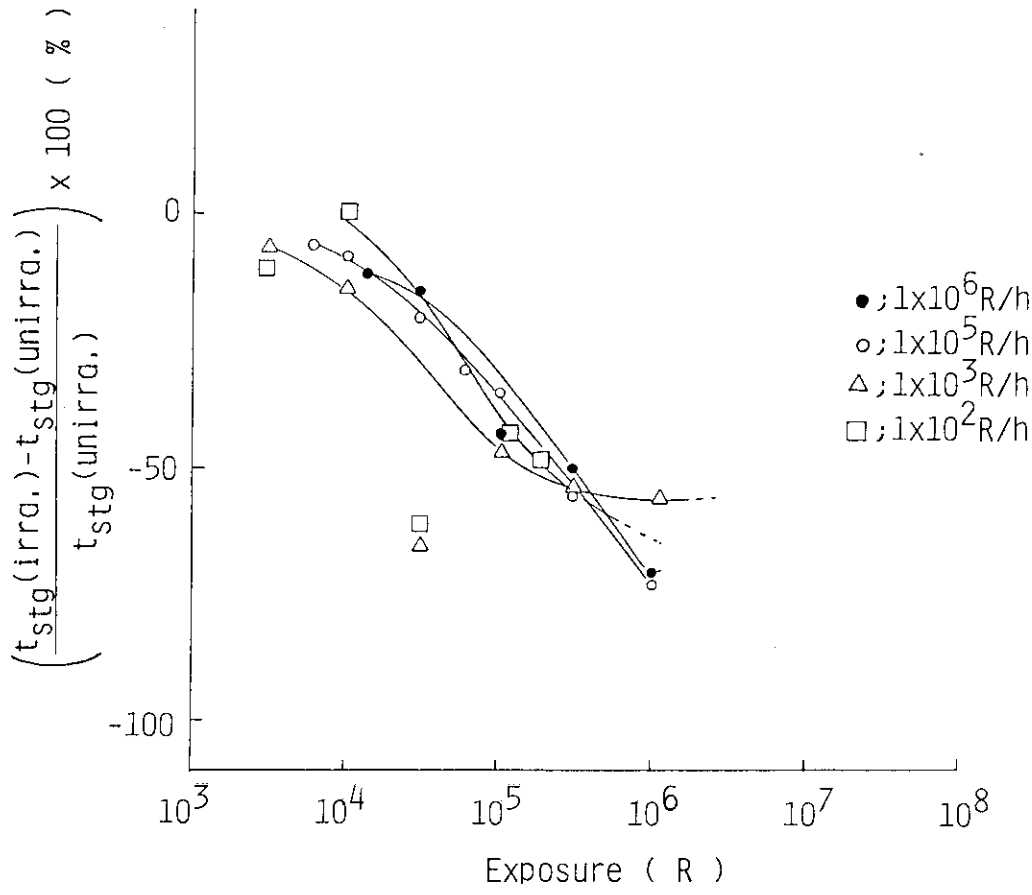


Fig. 3.16 Relationship between Storage Time(t_{stg}) of 2SB603 and Exposure.

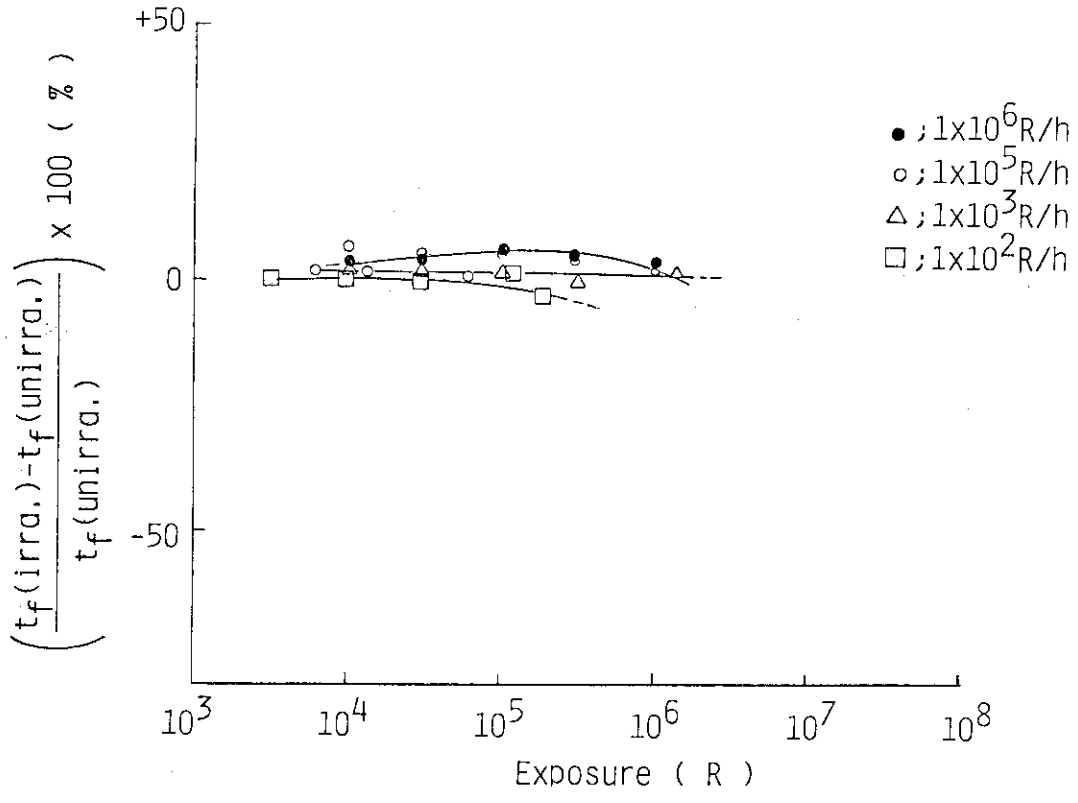


Fig. 3.17 Relationship between Fall Time(t_f) of 2SB603 and Exposure.

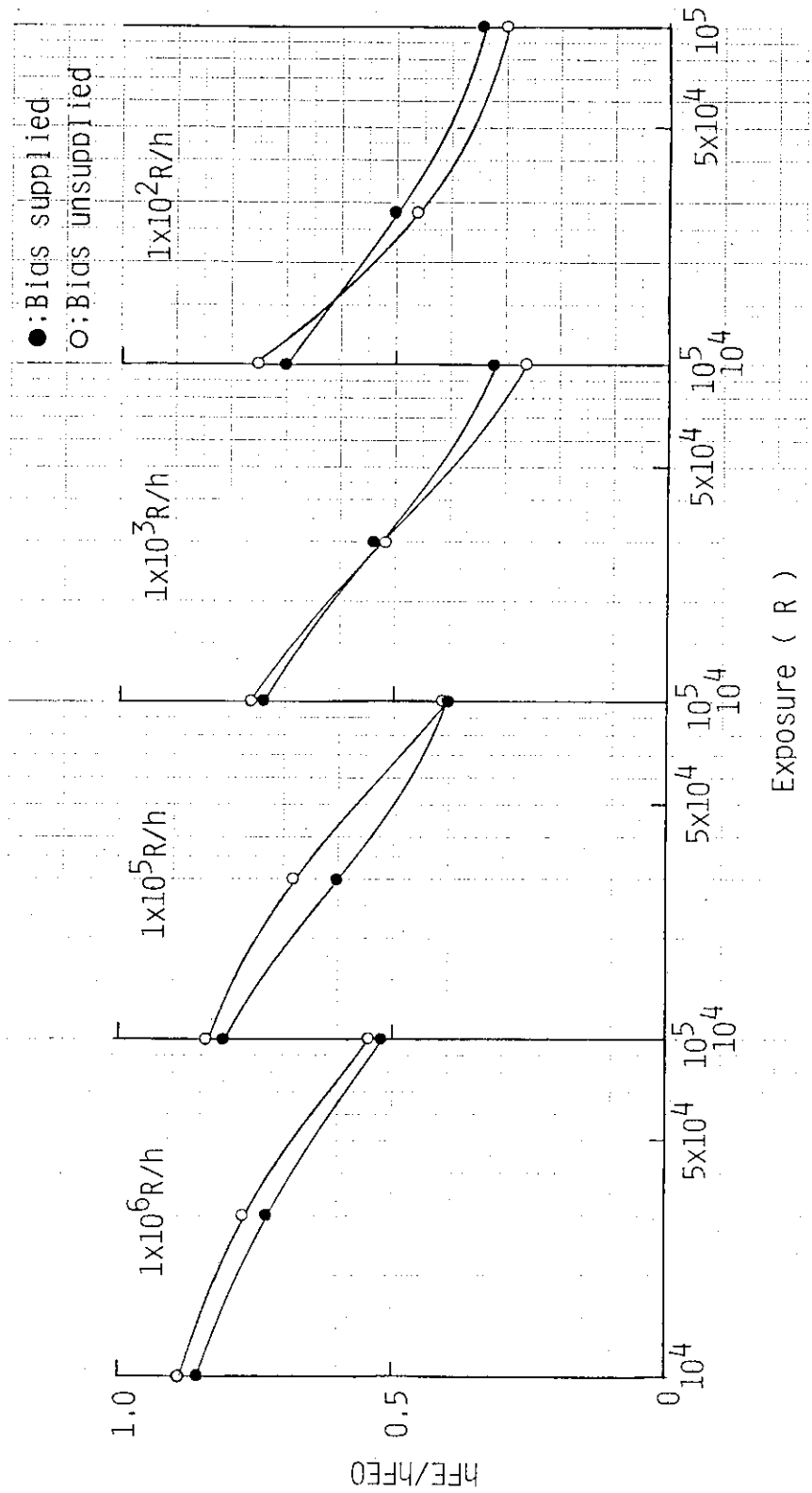


Fig. 3.18 Effect of Bias on Current Amplification Factor(h_{FE}/h_{FEO}) of 2SB603 at Various Irradiation Conditions.

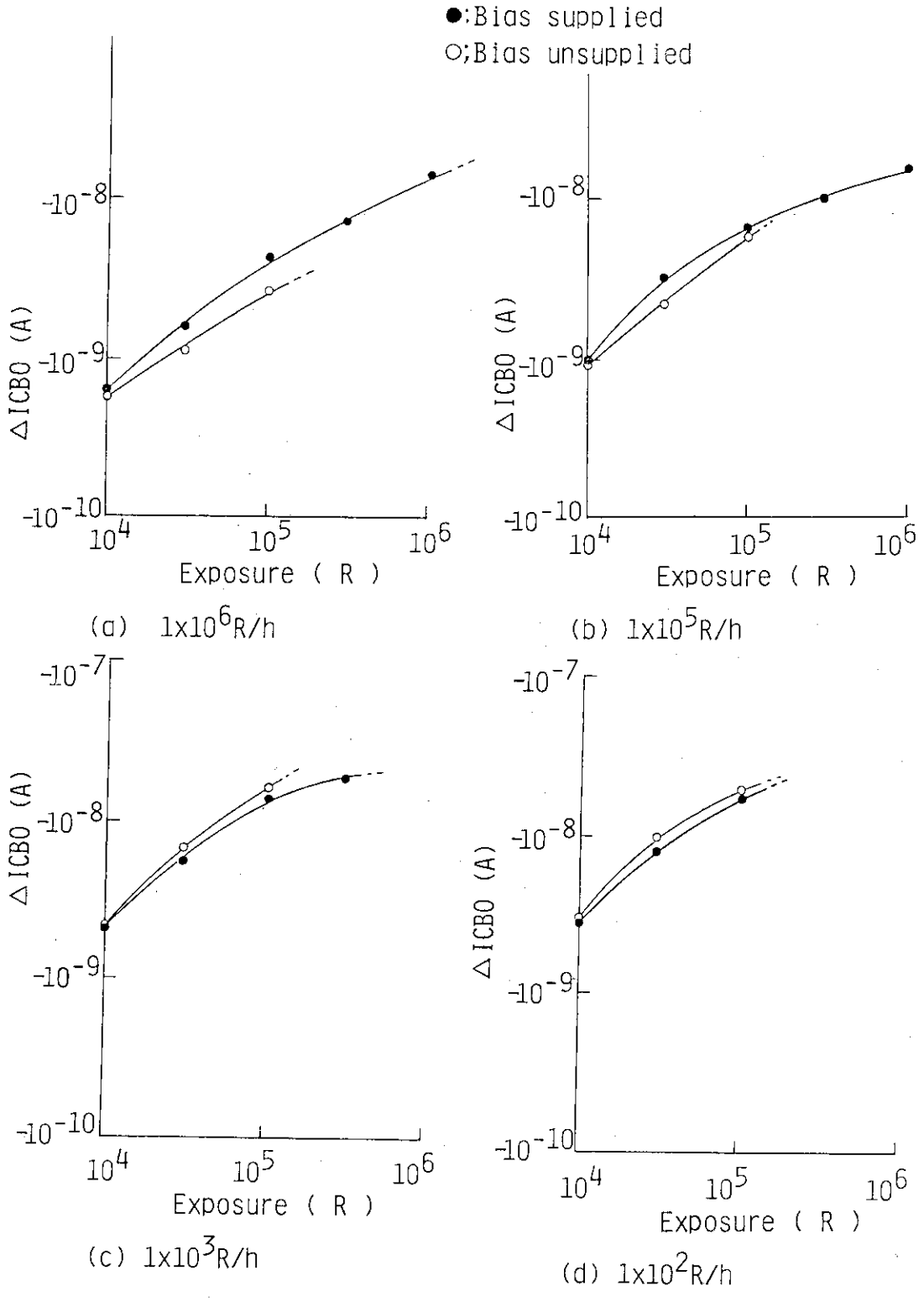


Fig. 3.19 Effect of Bias on I_{CBO} Increment(ΔI_{CBO}) of 2SB603 at Various Irradiation Conditions.

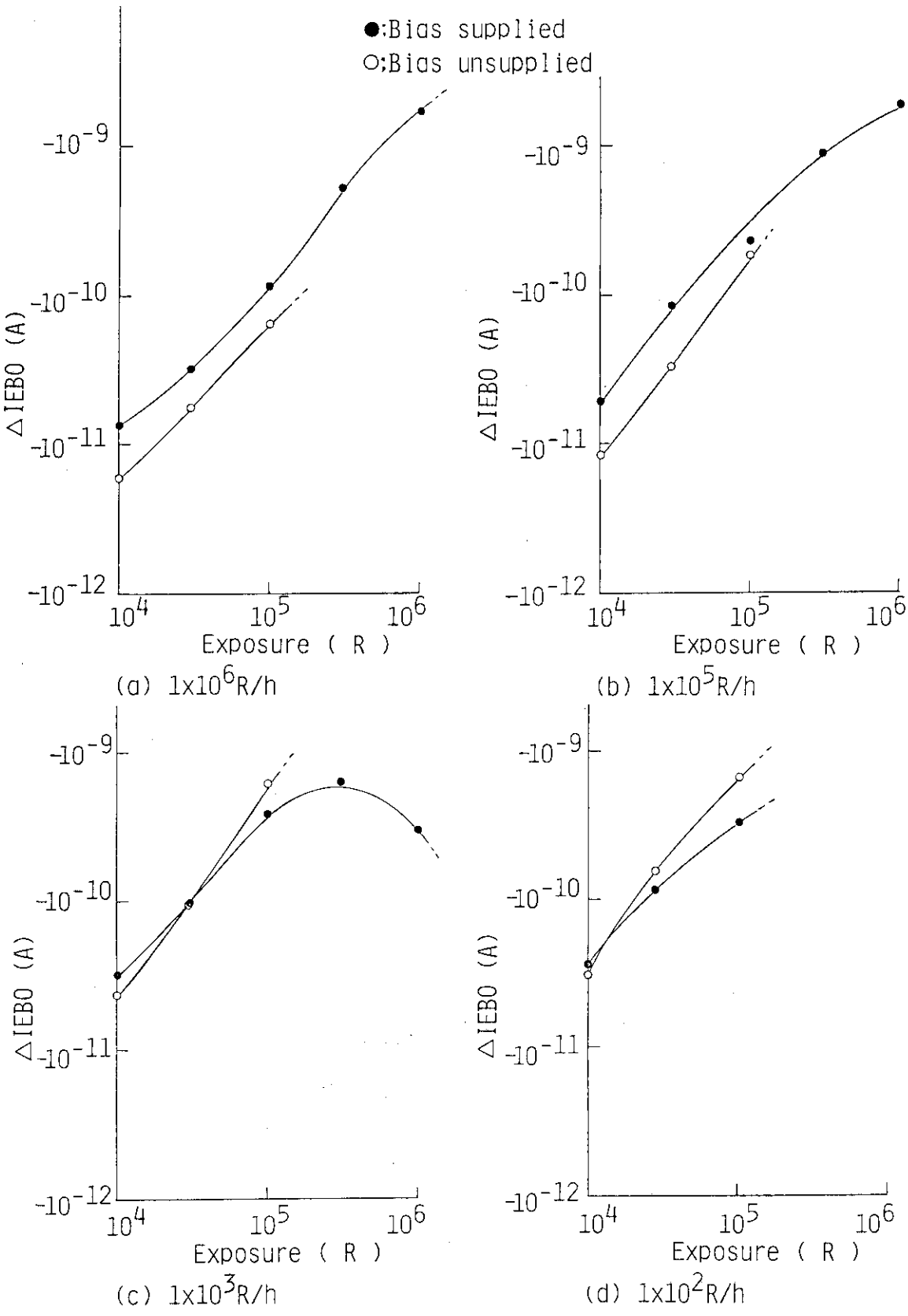


Fig. 3.20 Effect of Bias on I_{EBO} Increment(ΔI_{EBO}) of 2SB603 at Various Irradiation Conditions.

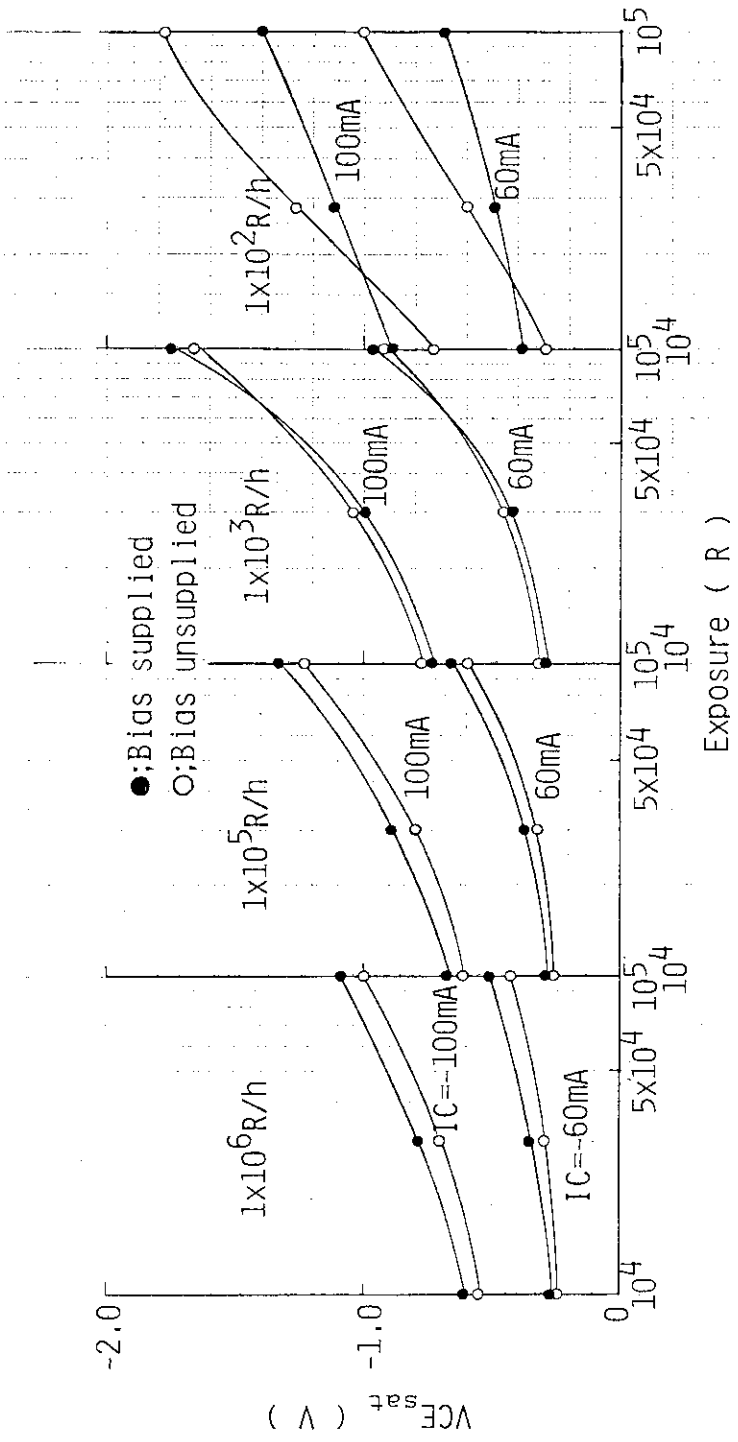


Fig. 3.21 Effect of Bias on Saturation Voltage($V_{CE(sat)}$) of 2SB603 at Various Irradiation Conditions.

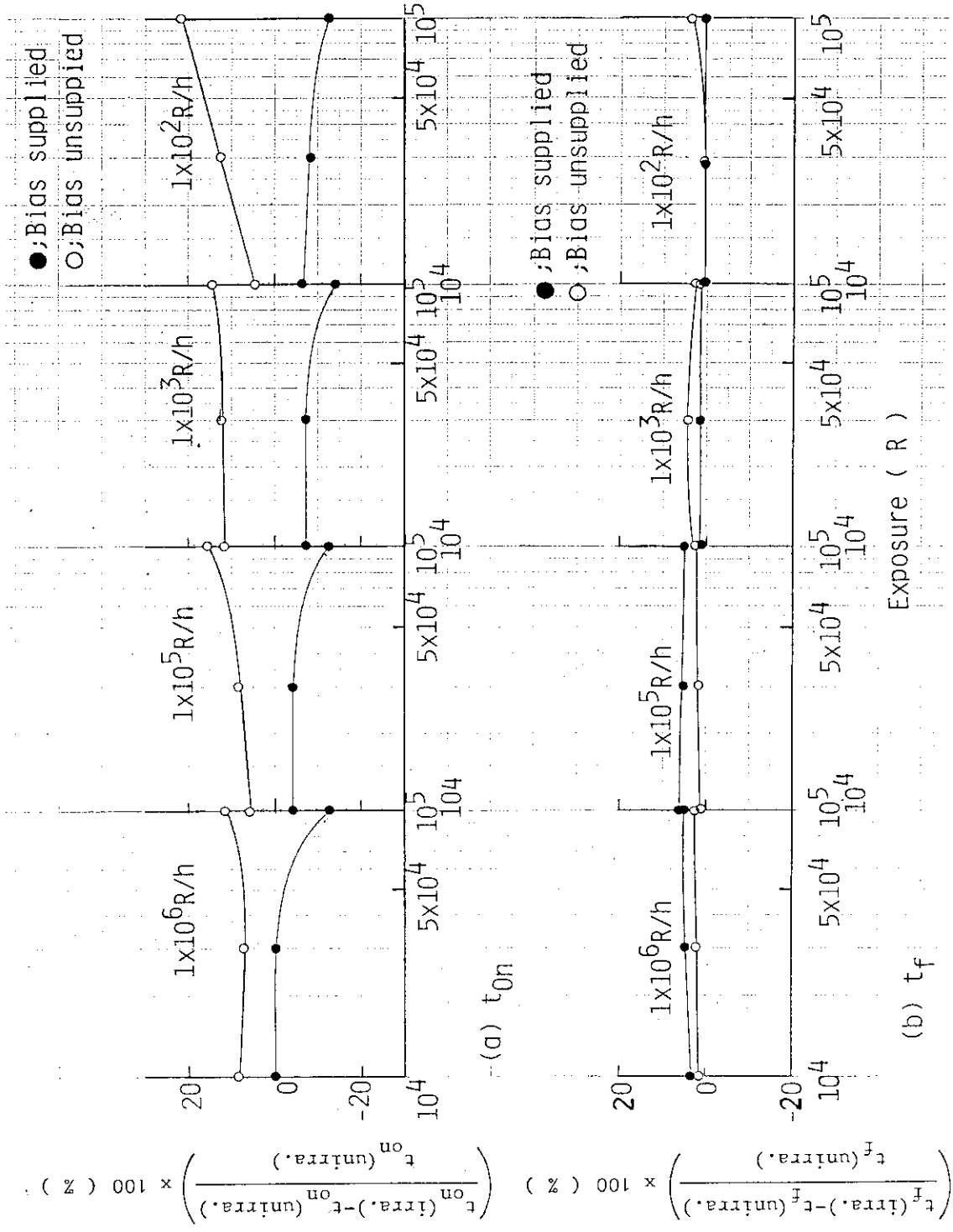


Fig. 3.22 Effect of Bias on Turn-on Time(t_{on}) and Fall Time(t_f) of 2SB603 at Various Irradiation Conditions.

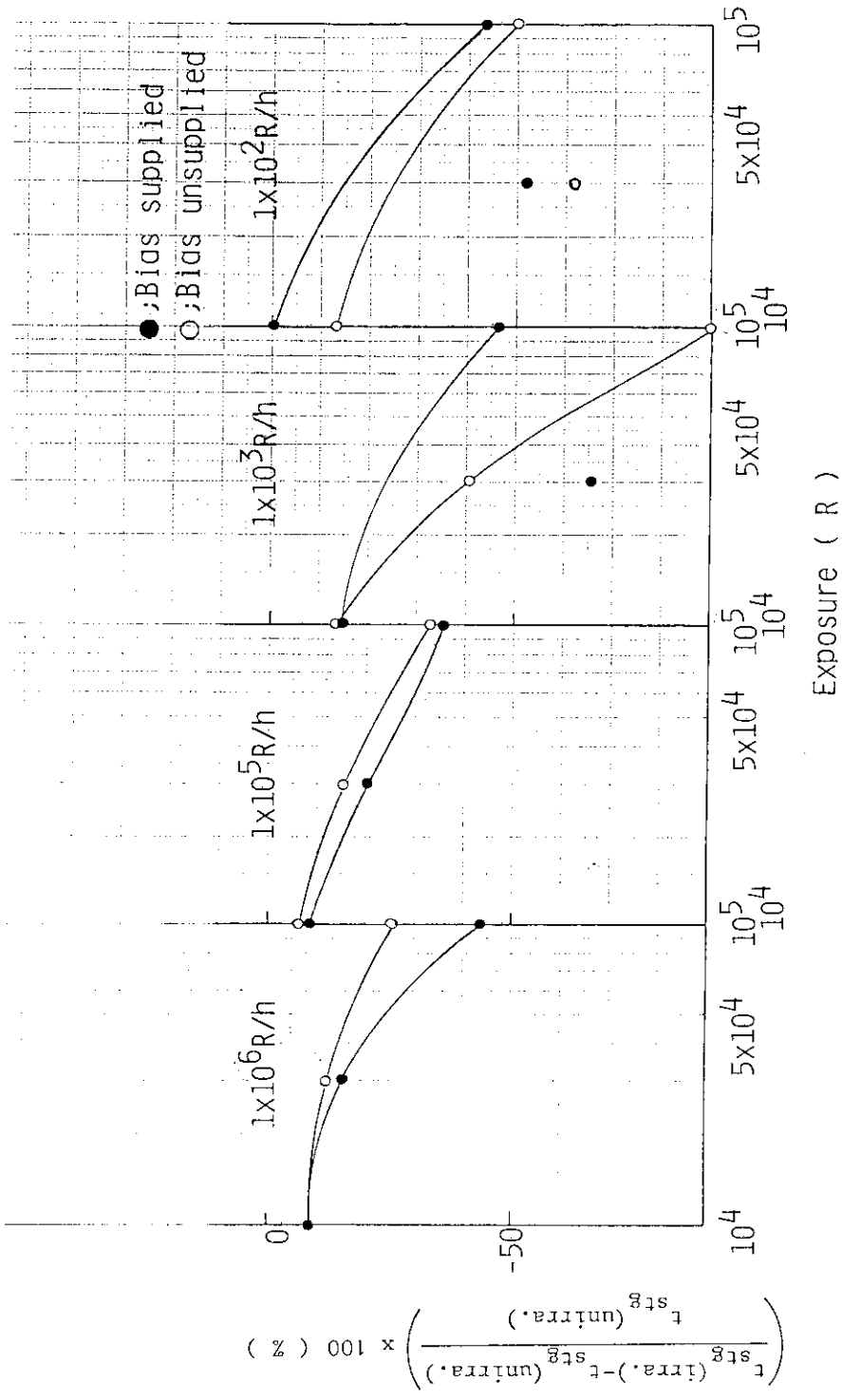


Fig. 3.23 Effect of Bias on Storage Time(t_{stg}) of 2SB603 at Various Irradiation Conditions.

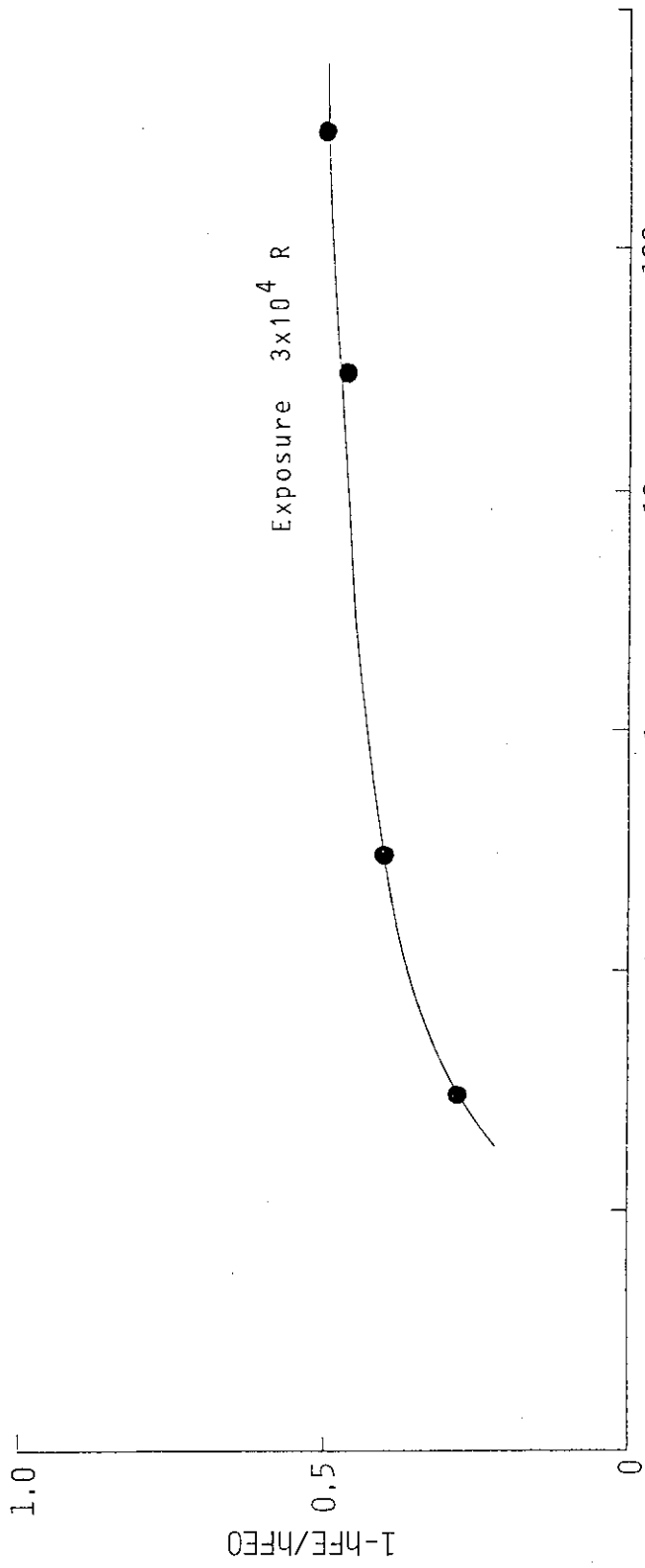


Fig. 3.24 Relationship between Irradiation Time and Residual h_{FE} of 2SB603

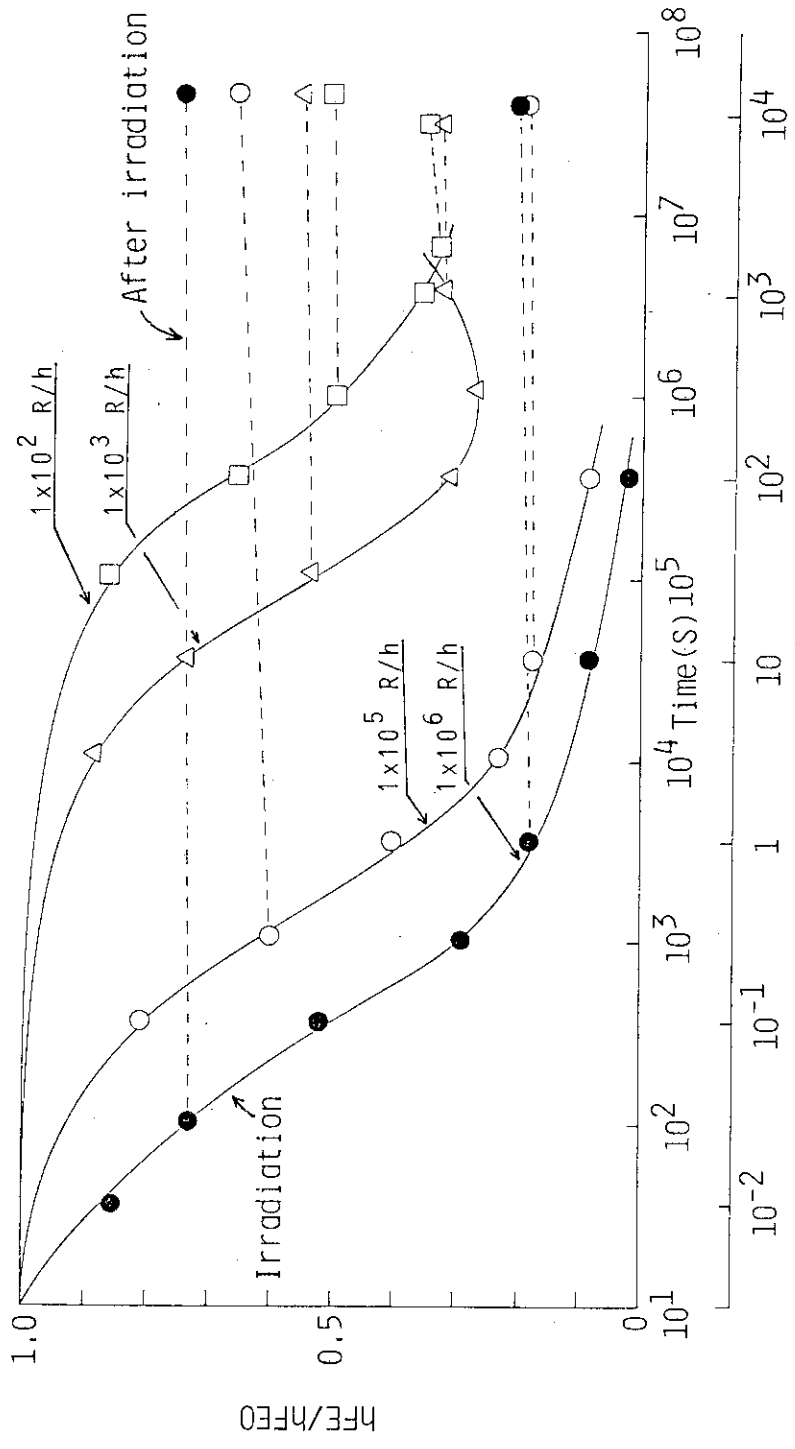


Fig. 3.25 Recovery of h_{FE} at Four Different Exposure Rate for 2SB603.

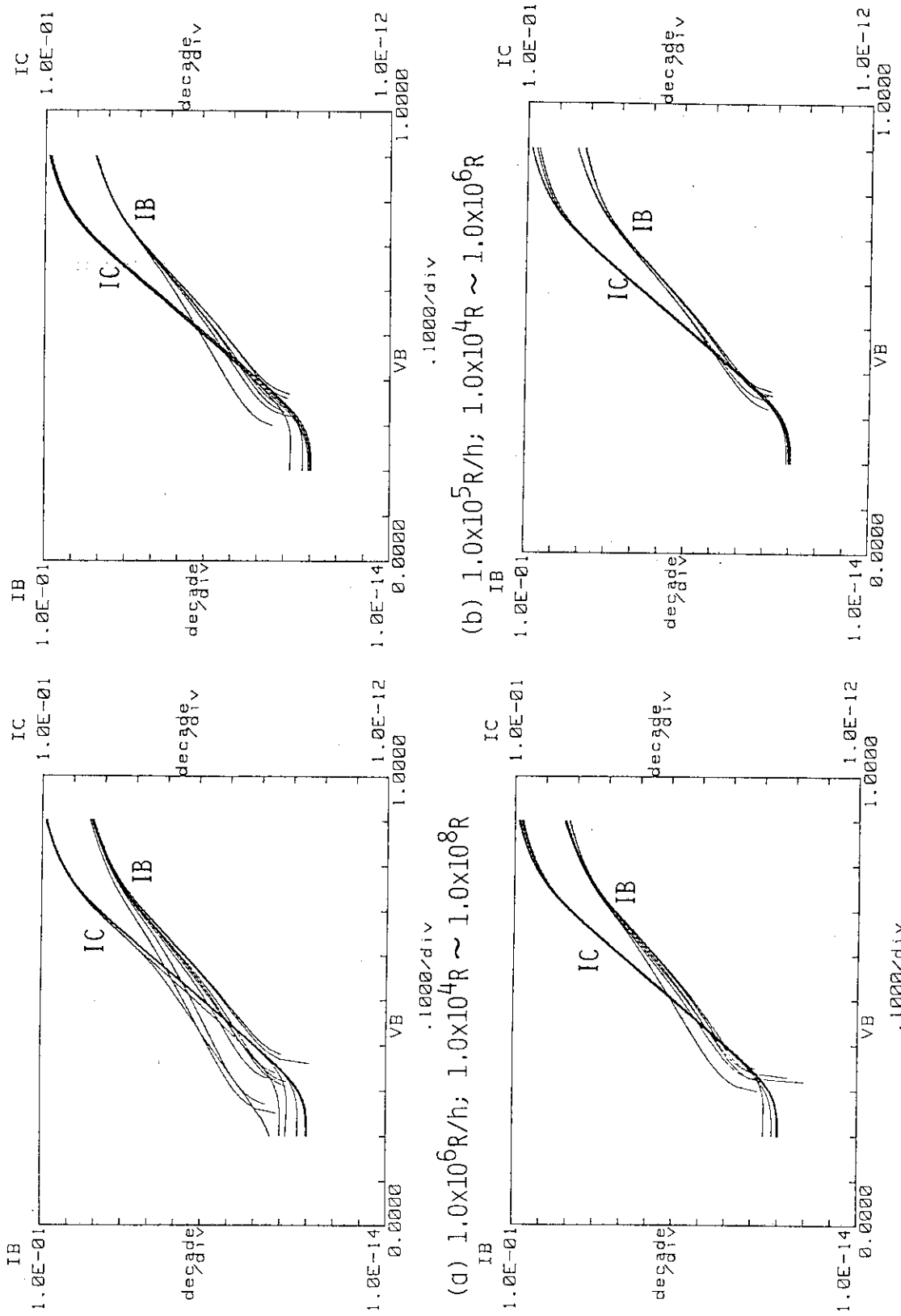


Fig. 3.26 Changes in Base Current(I_B) and Collector Current(I_C) of 2SC764 by γ-ray Irradiation.

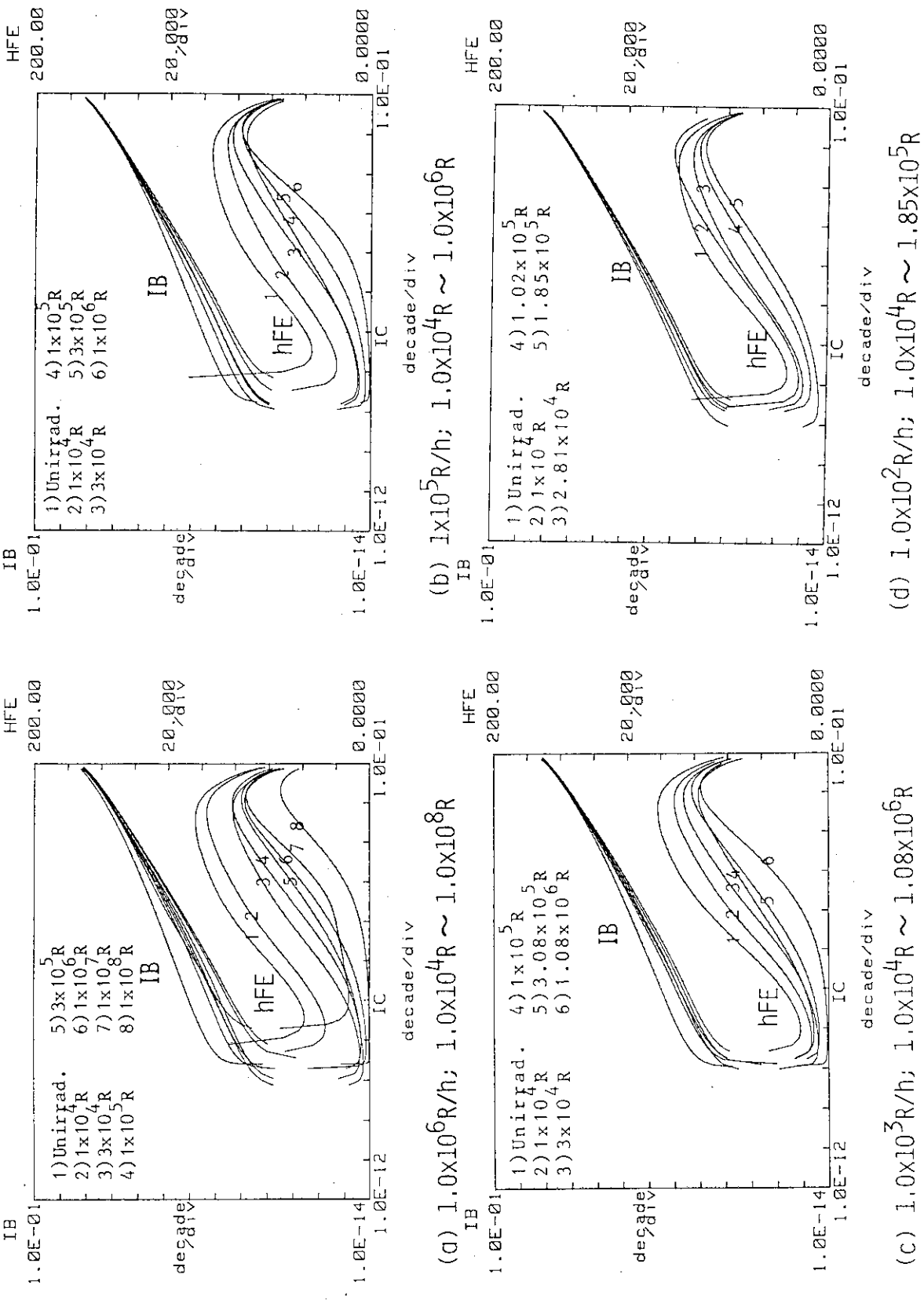
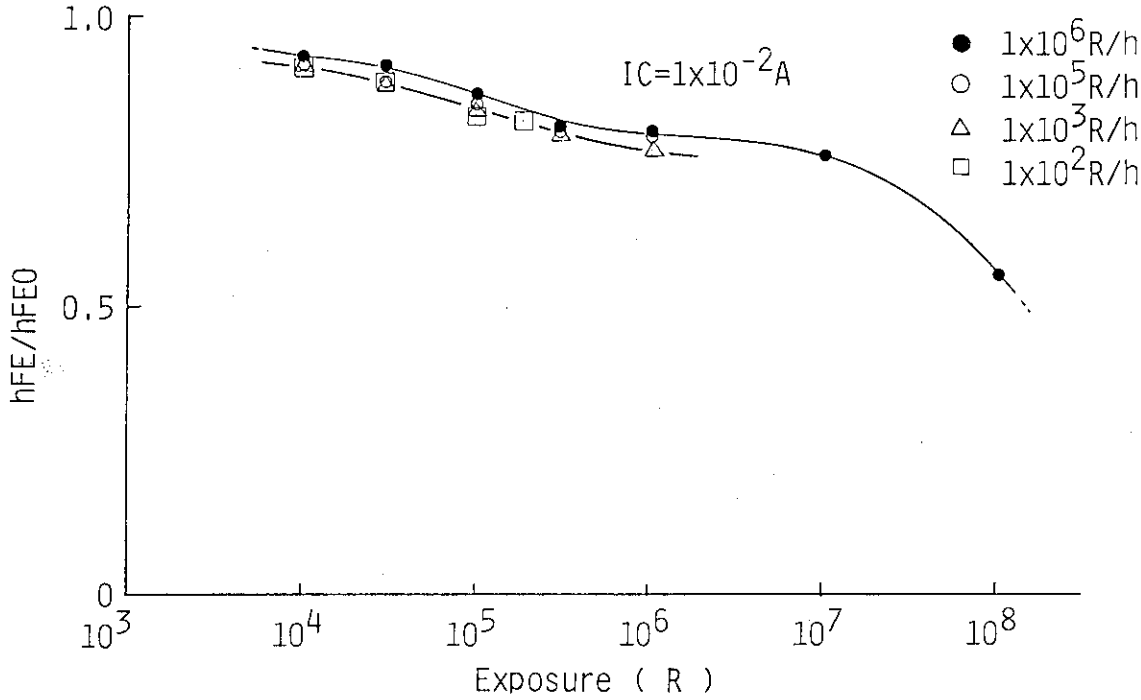
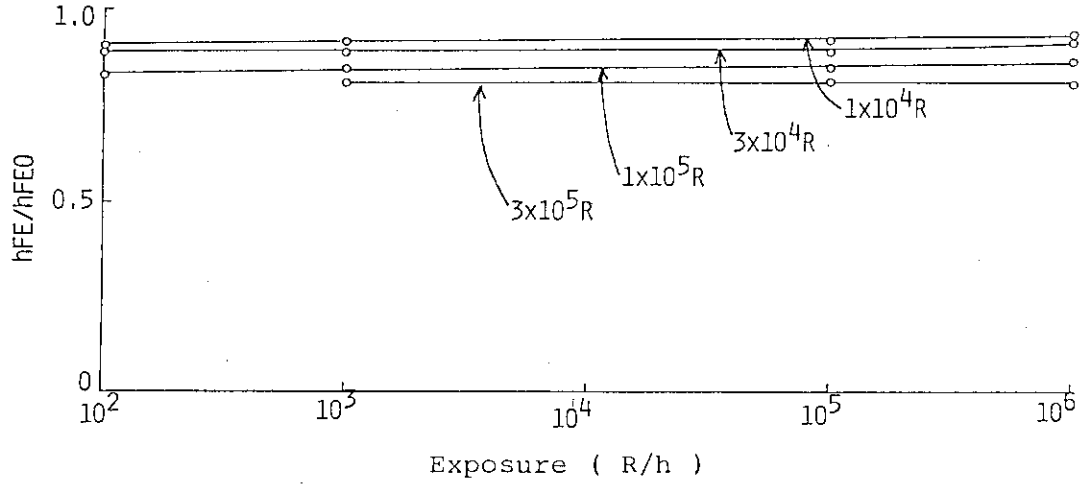


Fig. 3.27 Changes in Current Amplification Factor(h_{FE}) of 2SC764 by γ-ray Irradiation.



(a) Relationship between h_{FE} and Exposure



(b) Relationship between h_{FE} and Exposure Rate

Fig. 3.28 Relationship between h_{FE} of 2SC764 and Exposure, and between h_{FE} and Exposure Rate. $I_C=1\times10^{-2}$A, Bias Supplied.

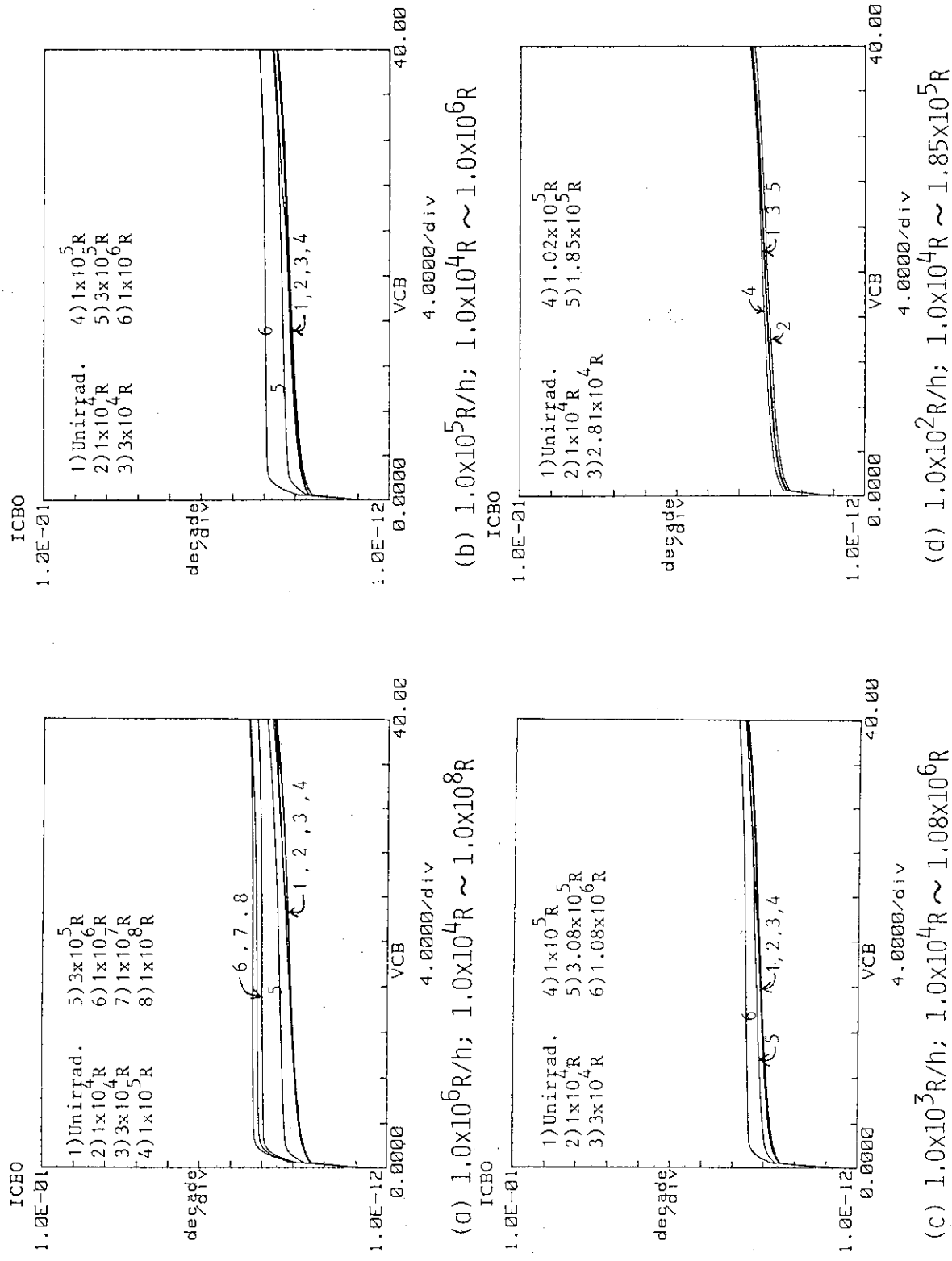


Fig. 3.29 Changes in Reverse Saturation Current(I_{CBO}) of 2SC764 by γ-ray Irradiation.

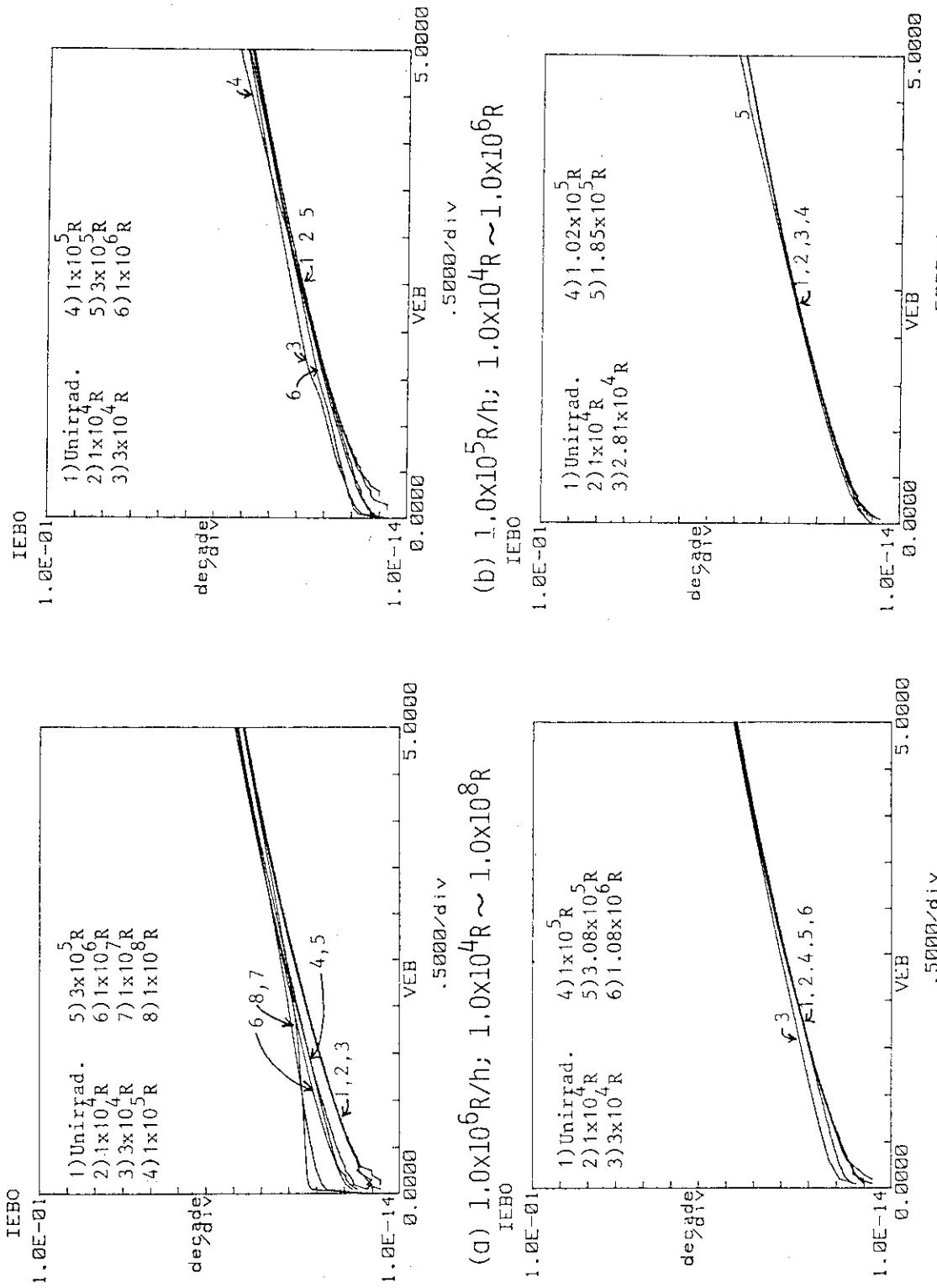


Fig. 3.30 Changes in Reverse Saturation Current(I_{EBO}) of 2SC764 by γ-ray Irradiation.

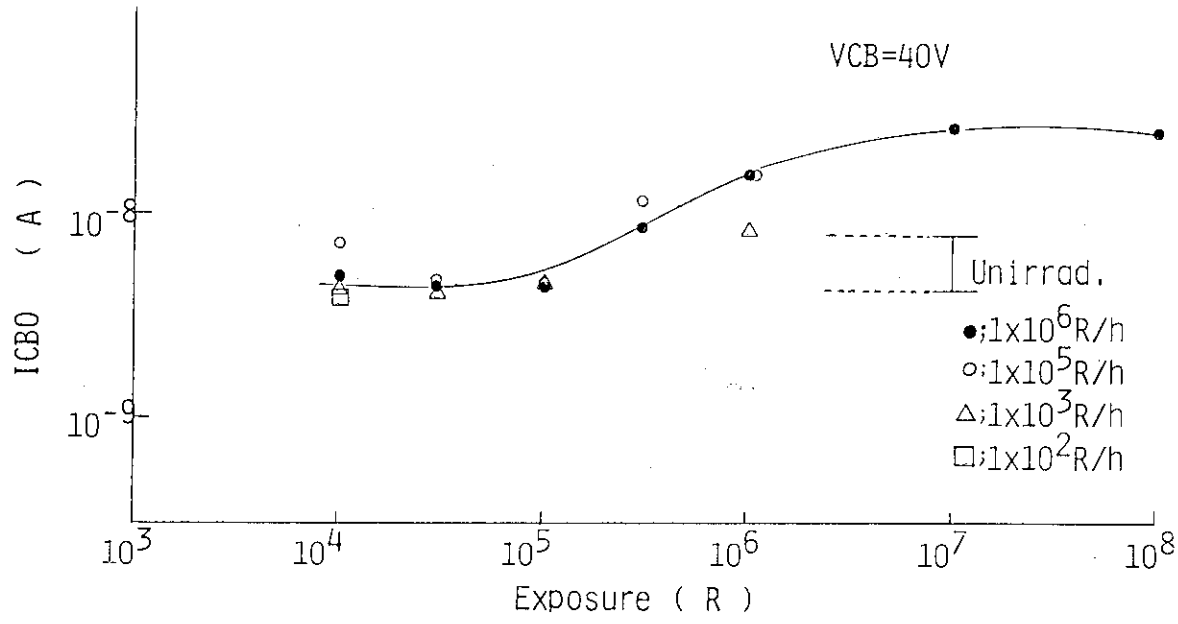


Fig. 3.31 Relationship between I_{CBO} and Exposure
V_{CB}=40V, Bias Supplied.

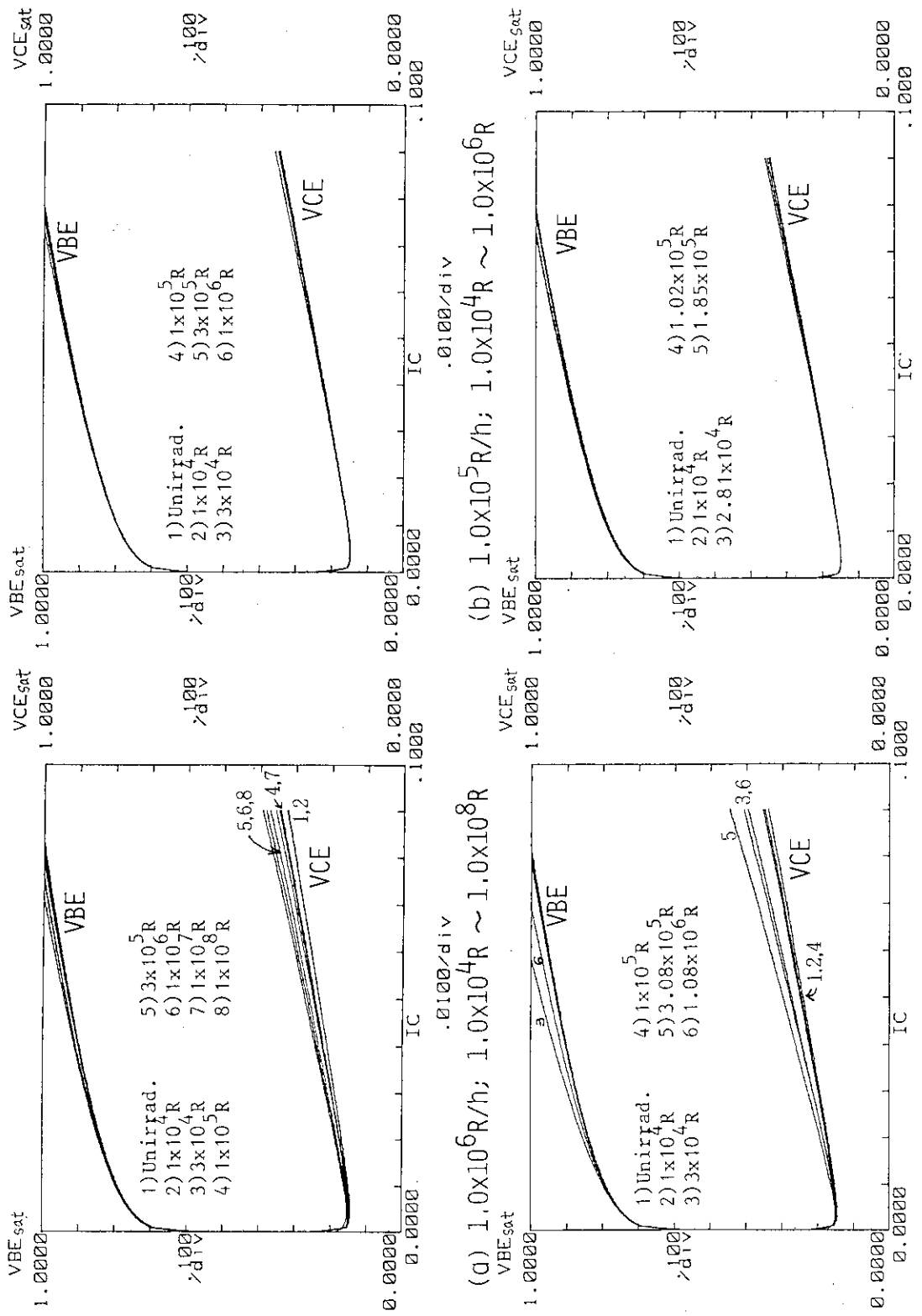
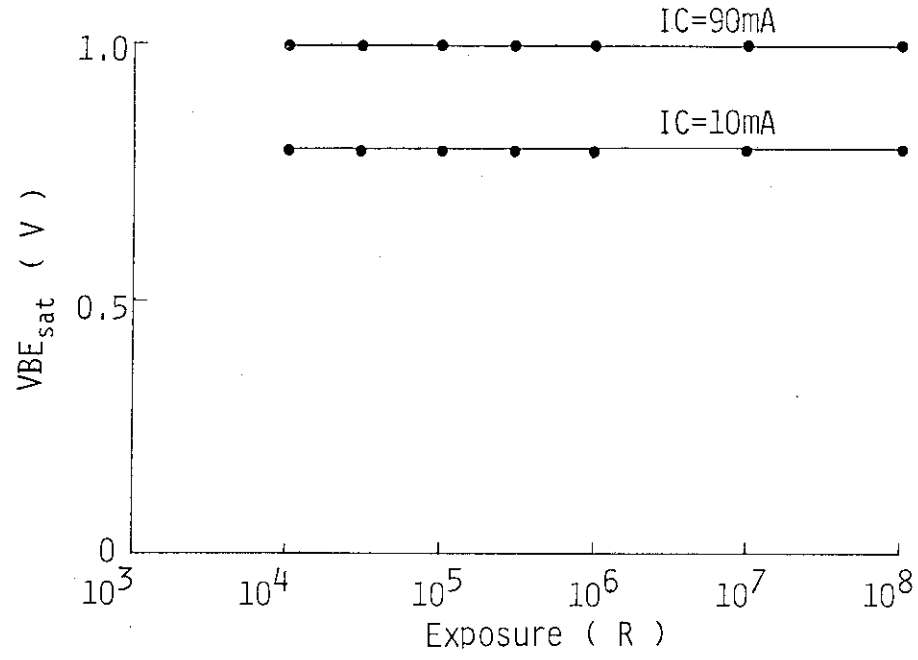
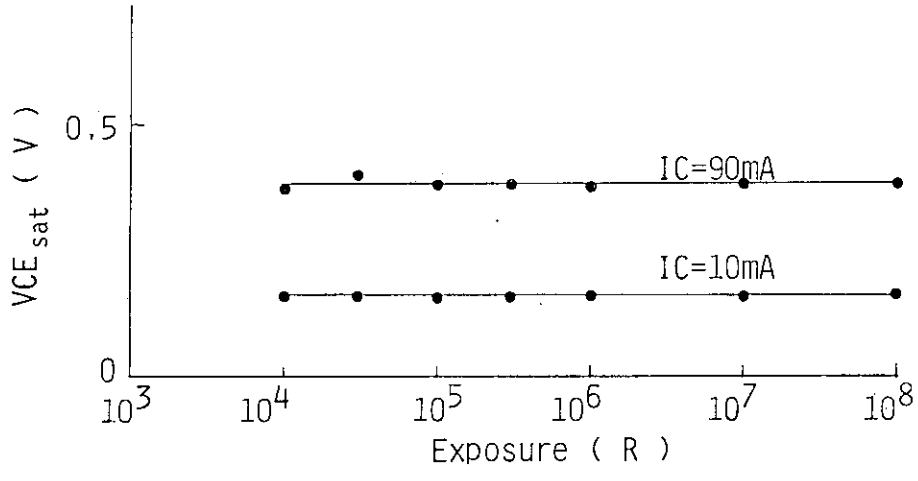


Fig. 3.32 Changes in Saturation Voltages ($V_{BE(sat)}$, $V_{CE(sat)}$) of 2SC764 by γ-ray Irradiation.

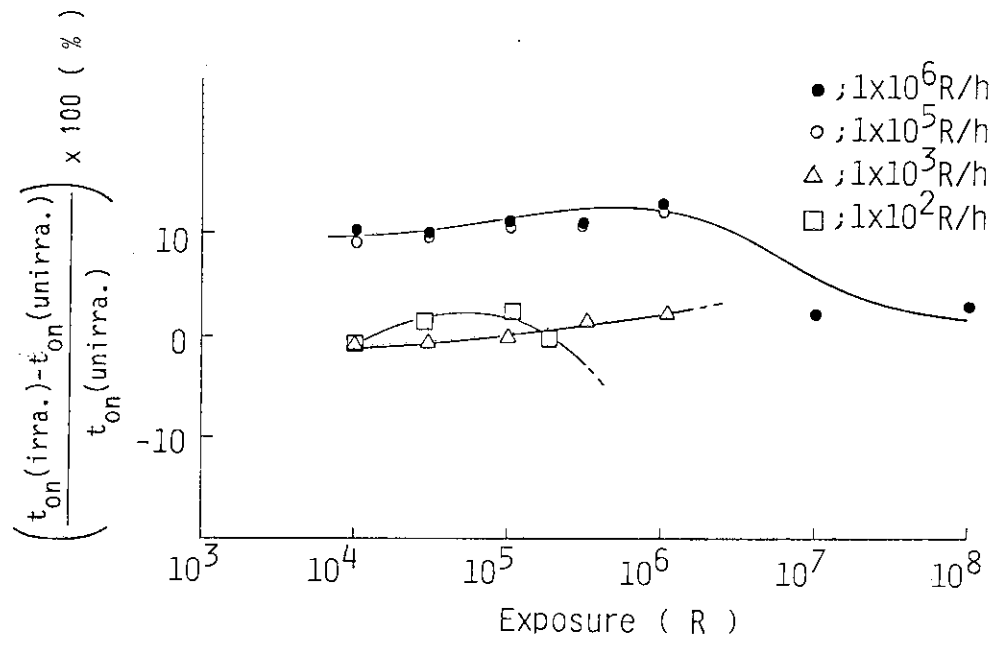


(a) $V_{BE(sat)}$ vs. Exposure at Various Exposure Rate (1×10^2R/h~1×10^6R/h)

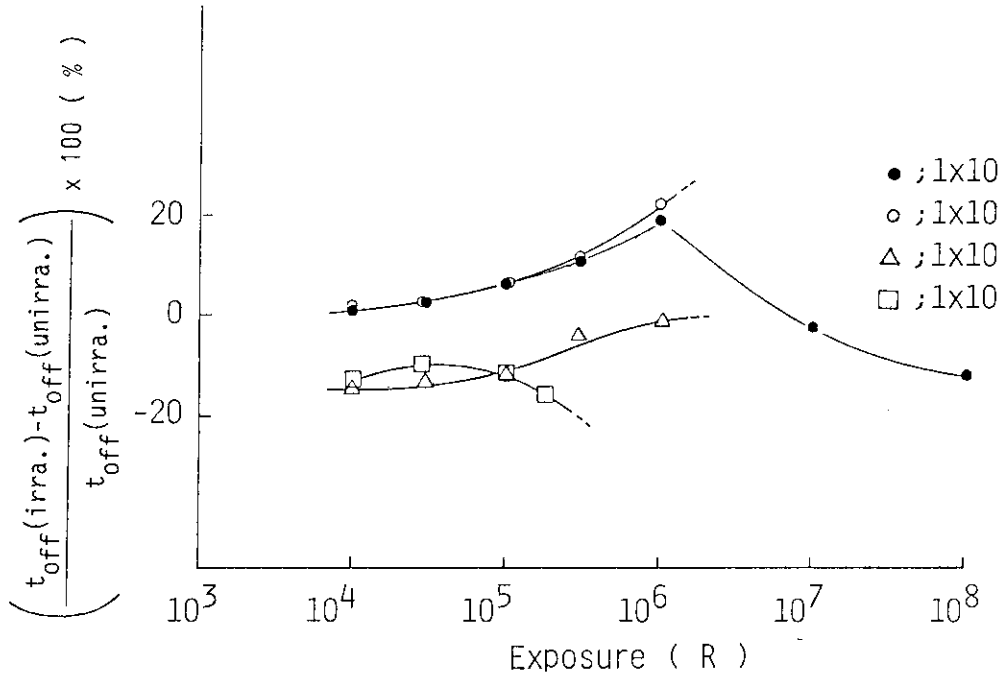


(b) $V_{CE(sat)}$ vs. Exposure at Various Exposure Rate (1×10^2R/h~1×10^6R/h)

Fig. 3.33 Relationship between Saturation Voltages($V_{BE(sat)}$ and $V_{CE(sat)}$) of 2SC764 and Exposure.
I_C=10mA and 90mA



(a) t_{on} vs. Exposure



(b) t_{off} vs. Exposure

Fig. 3.34 Relationship between Turn-on Time(t_{on}) of 2SC764 and Exposure, and Turn-off Time(t_{off}) and Exposure.

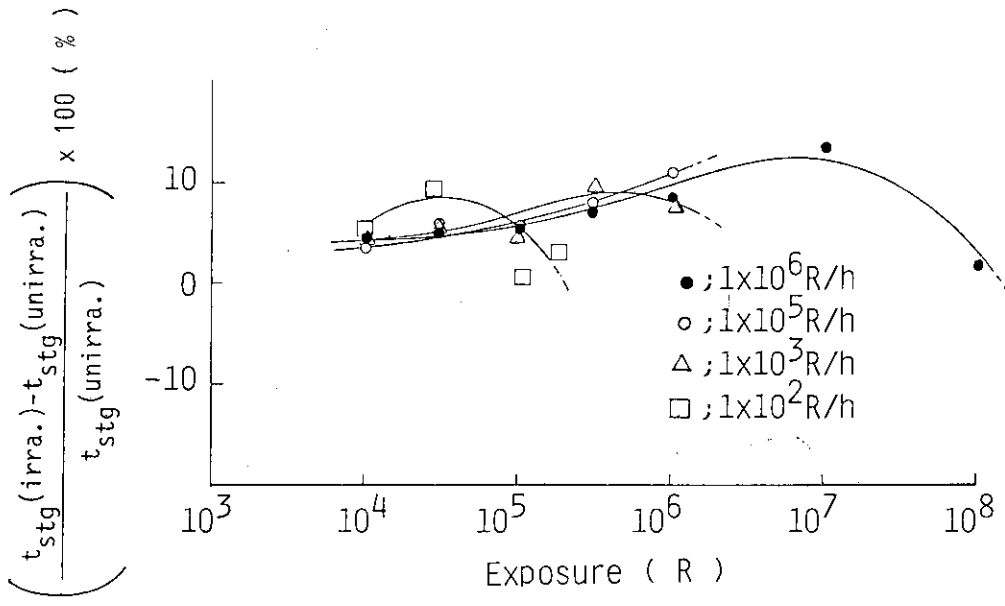


Fig. 3.35 Relationship between Storage Time(t_{stg}) of 2SC764 and Exposure.

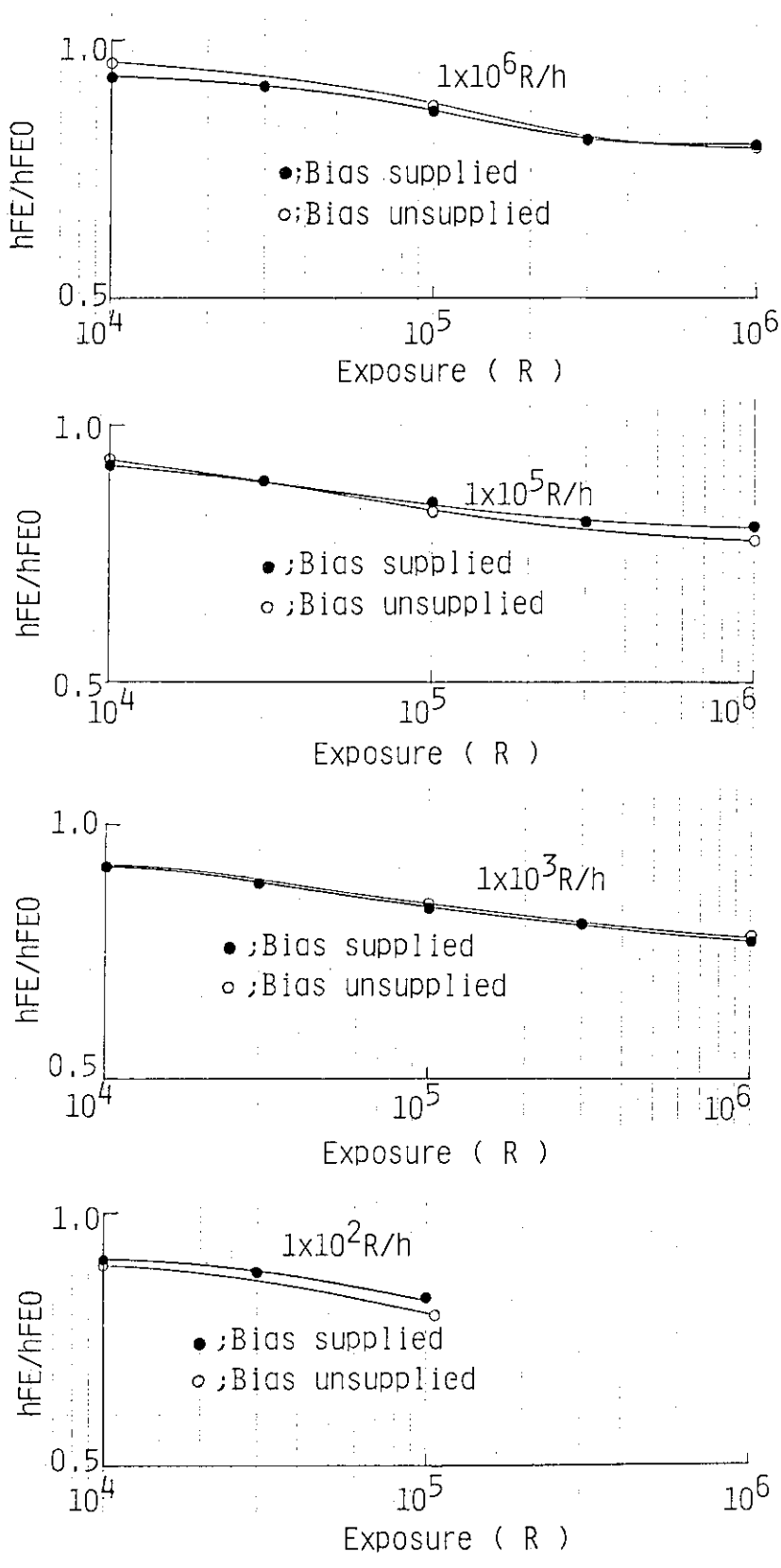


Fig. 3.36 Effect of Bias on Current Amplification Factor(h_{FE}/h_{FEO}) of 2SC764 at Various Irradiation Conditions.

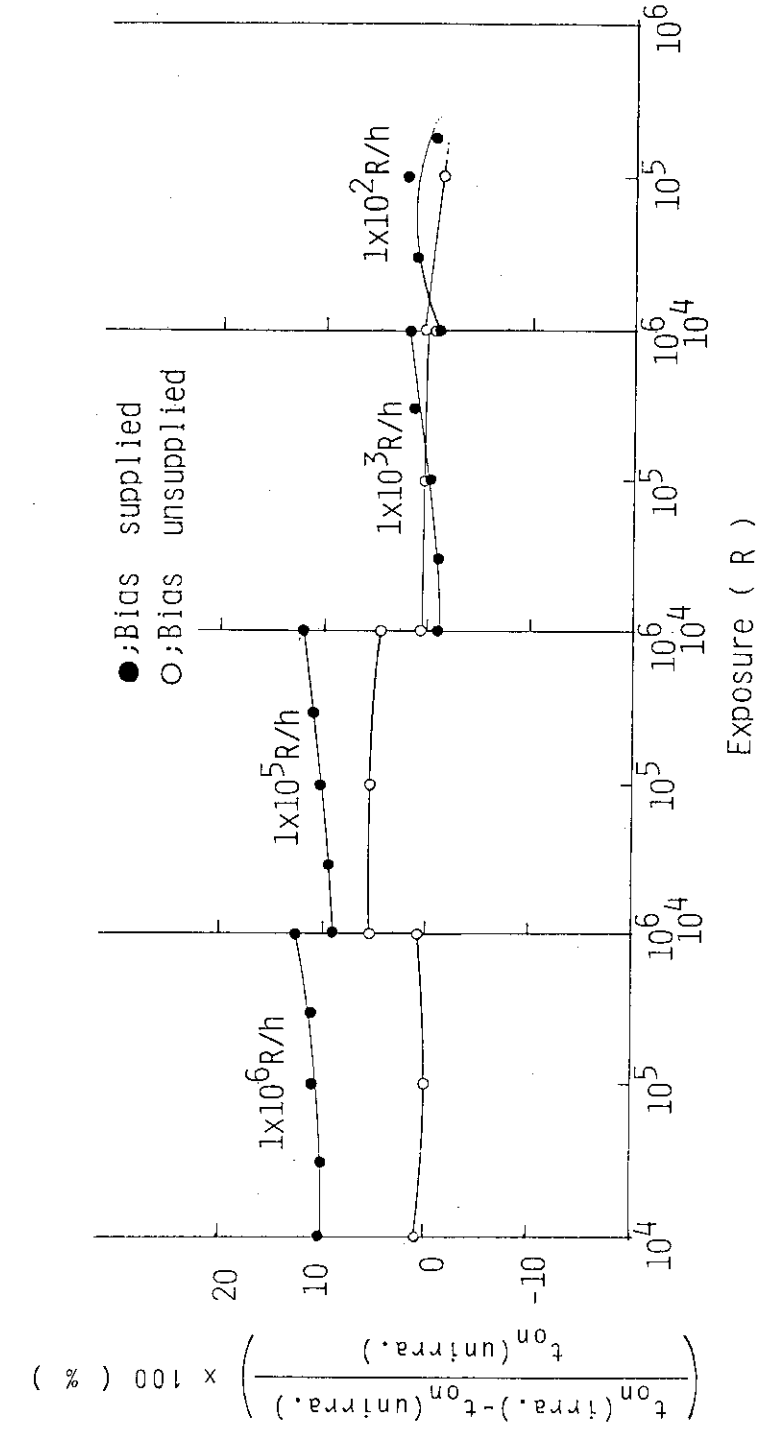


Fig. 3.37 Effect of Bias on Turn-on Time(t_{on}) of 2SC764 at Various Irradiation Conditions.

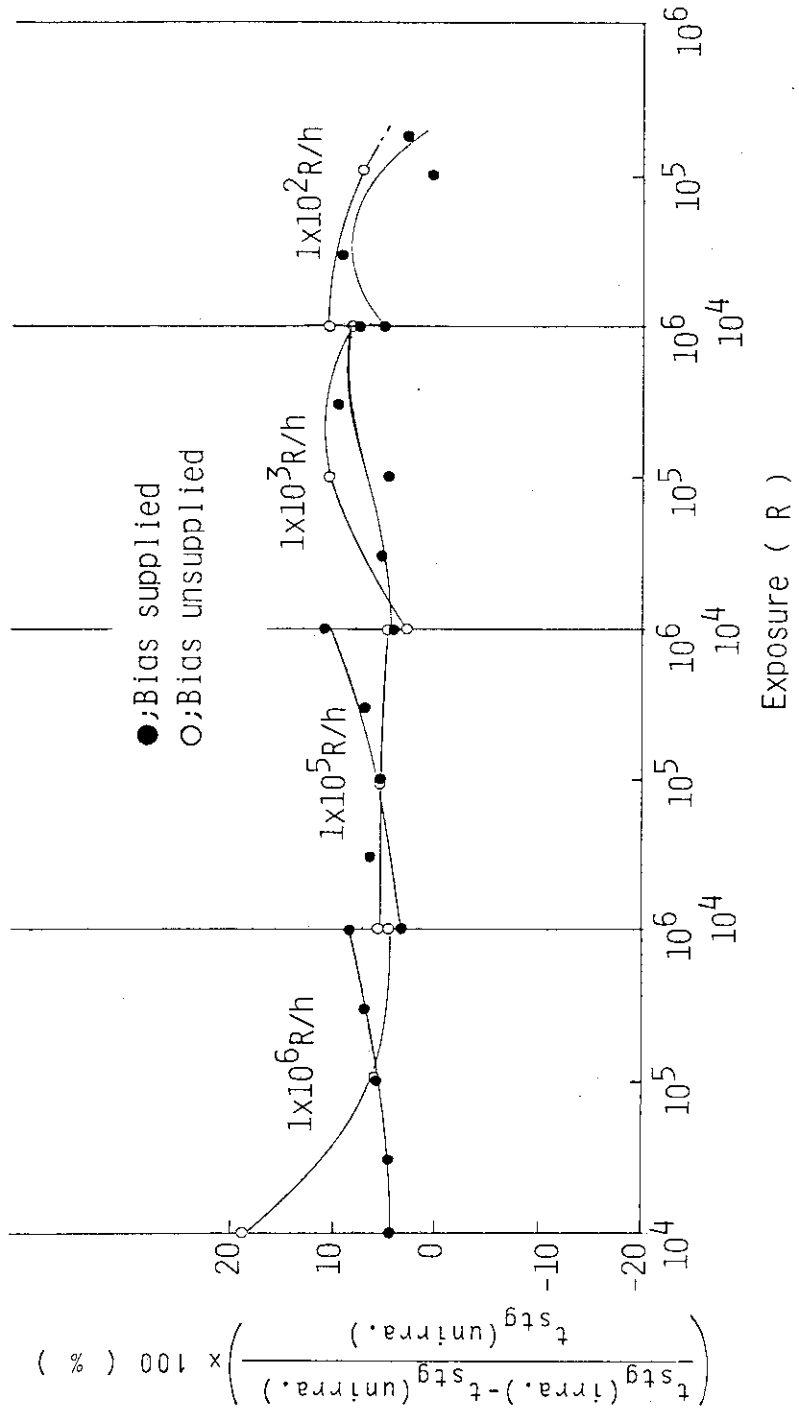


Fig. 3.38 Effect of Bias on Storage Time(t_{stg}) of 2SC764 at Various Irradiation Coditions.

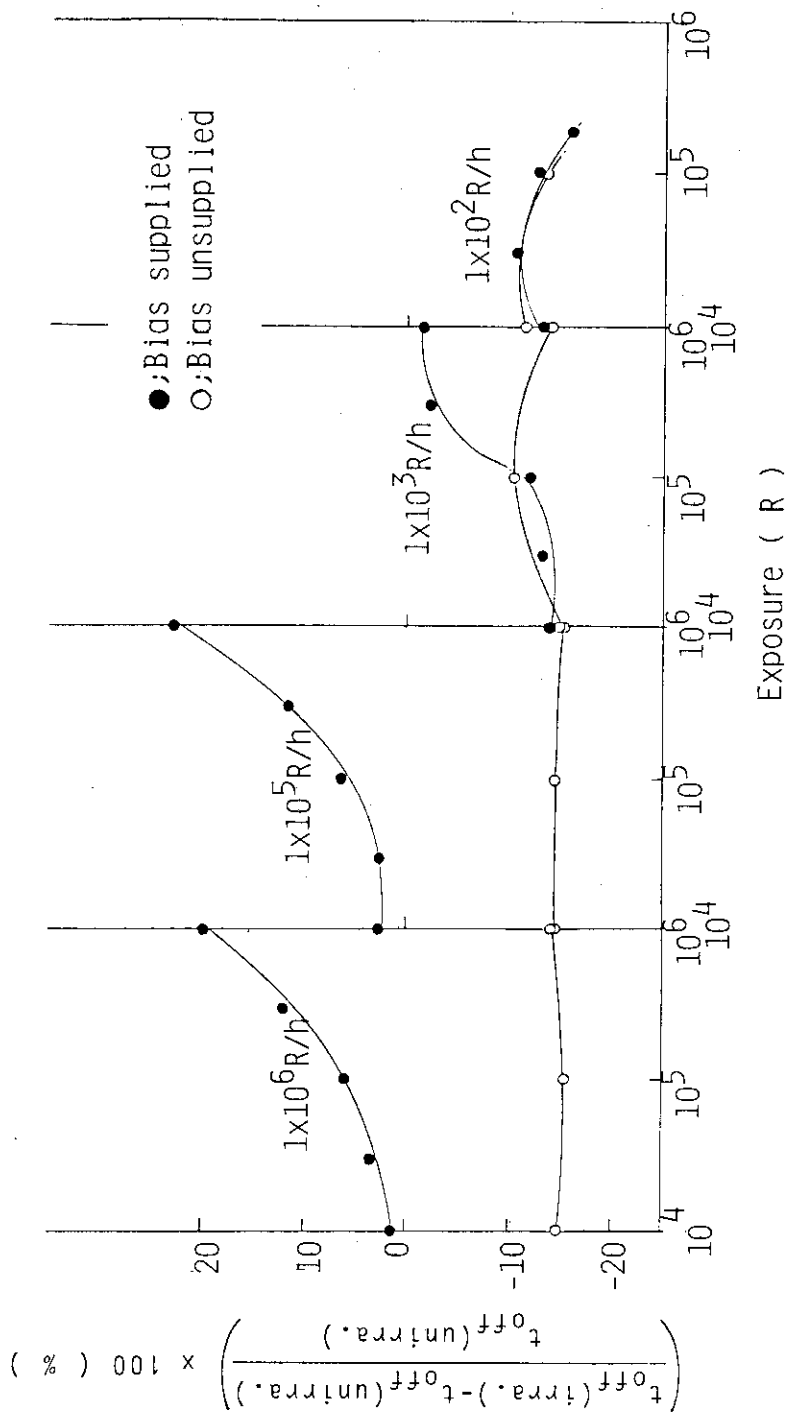


Fig. 3.39 Effect of Bias on Turu-off Time(t_{off}) of 2SC764 at Various Irradiation Conditions.

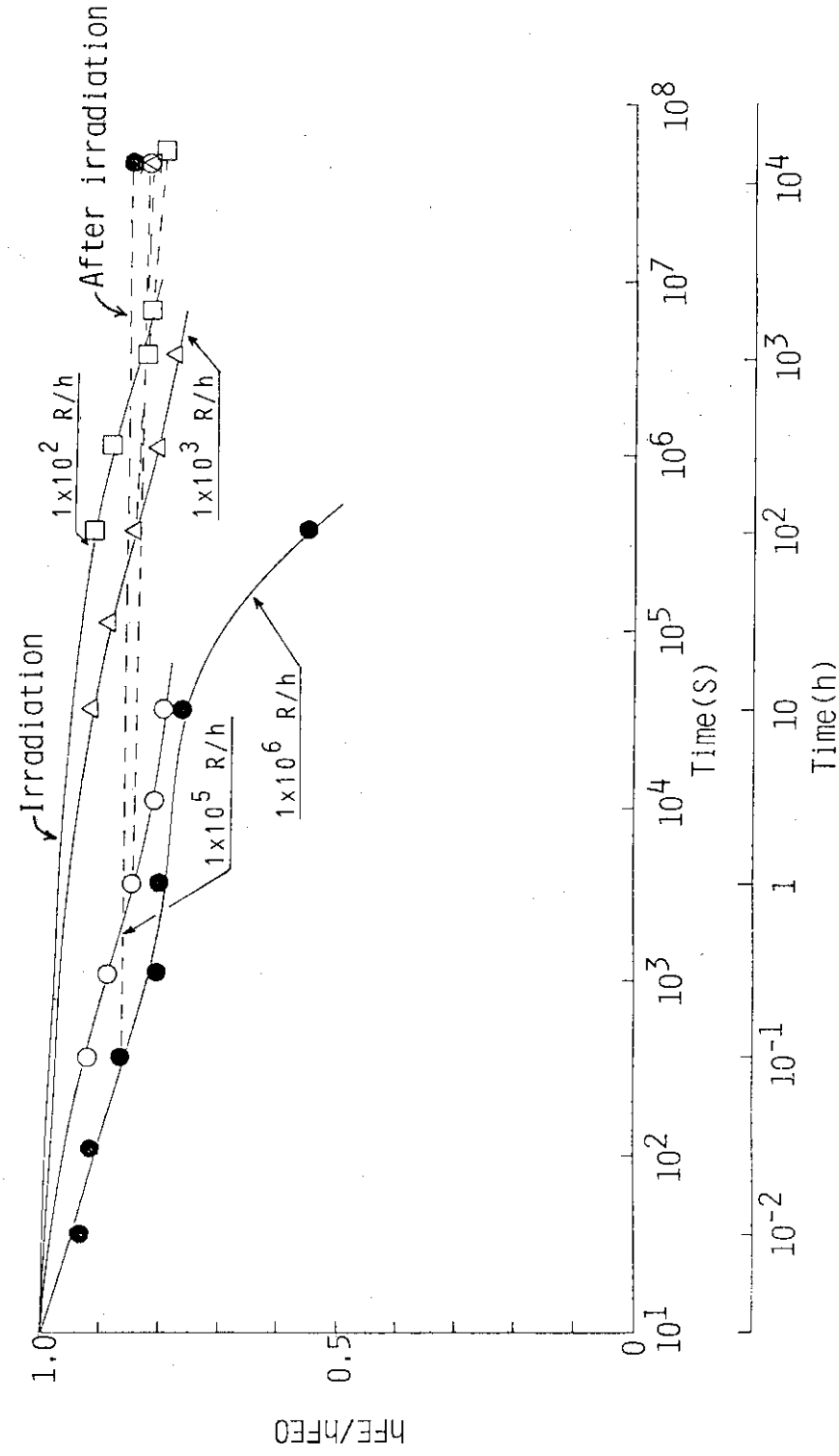


Fig. 3.40 Recovery of h_{FE} at Four Different Exposure Rates for 2SC764.

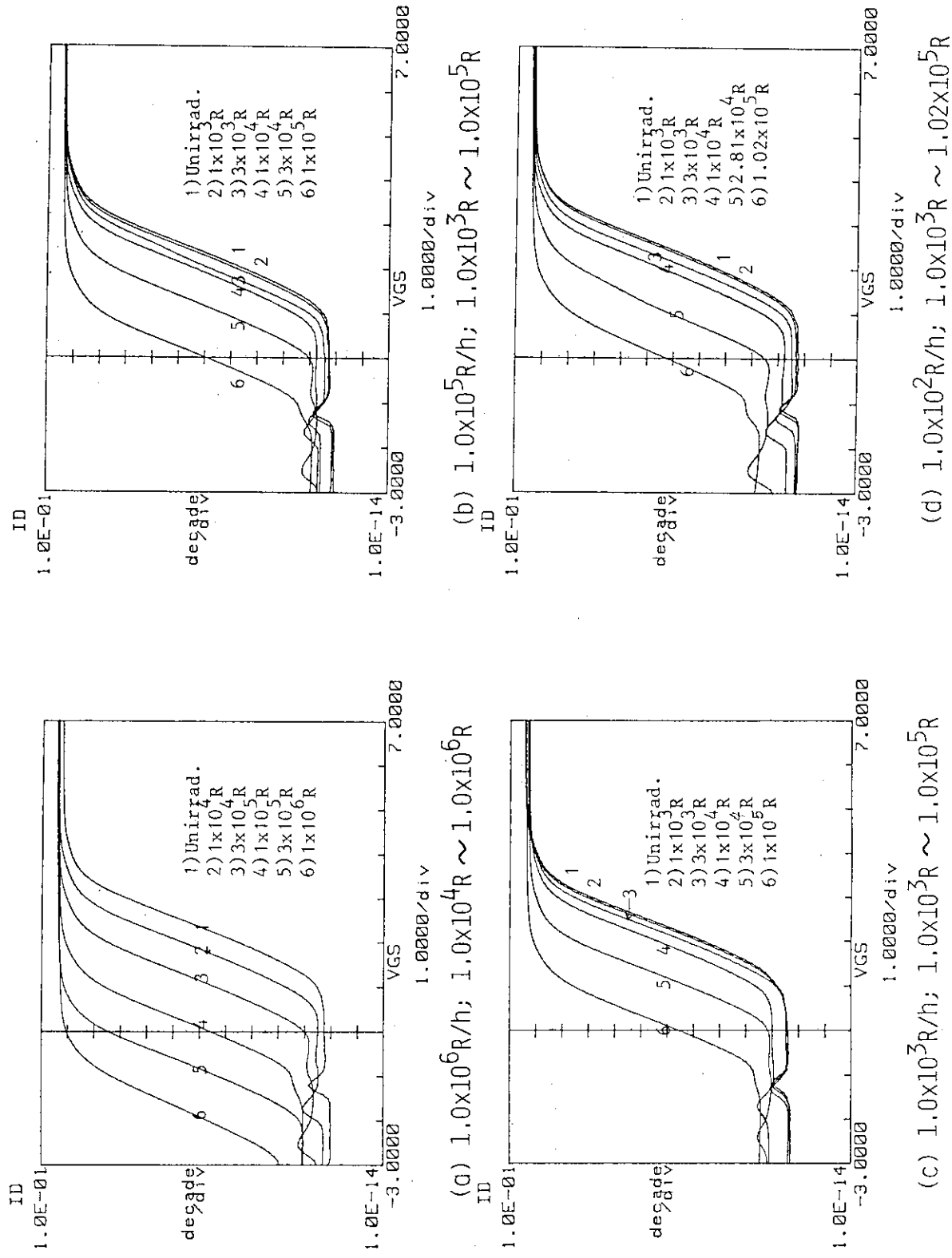


Fig. 3.41 Changes in Drain Current (I_D) of 2SK458 by γ-ray Irradiation.

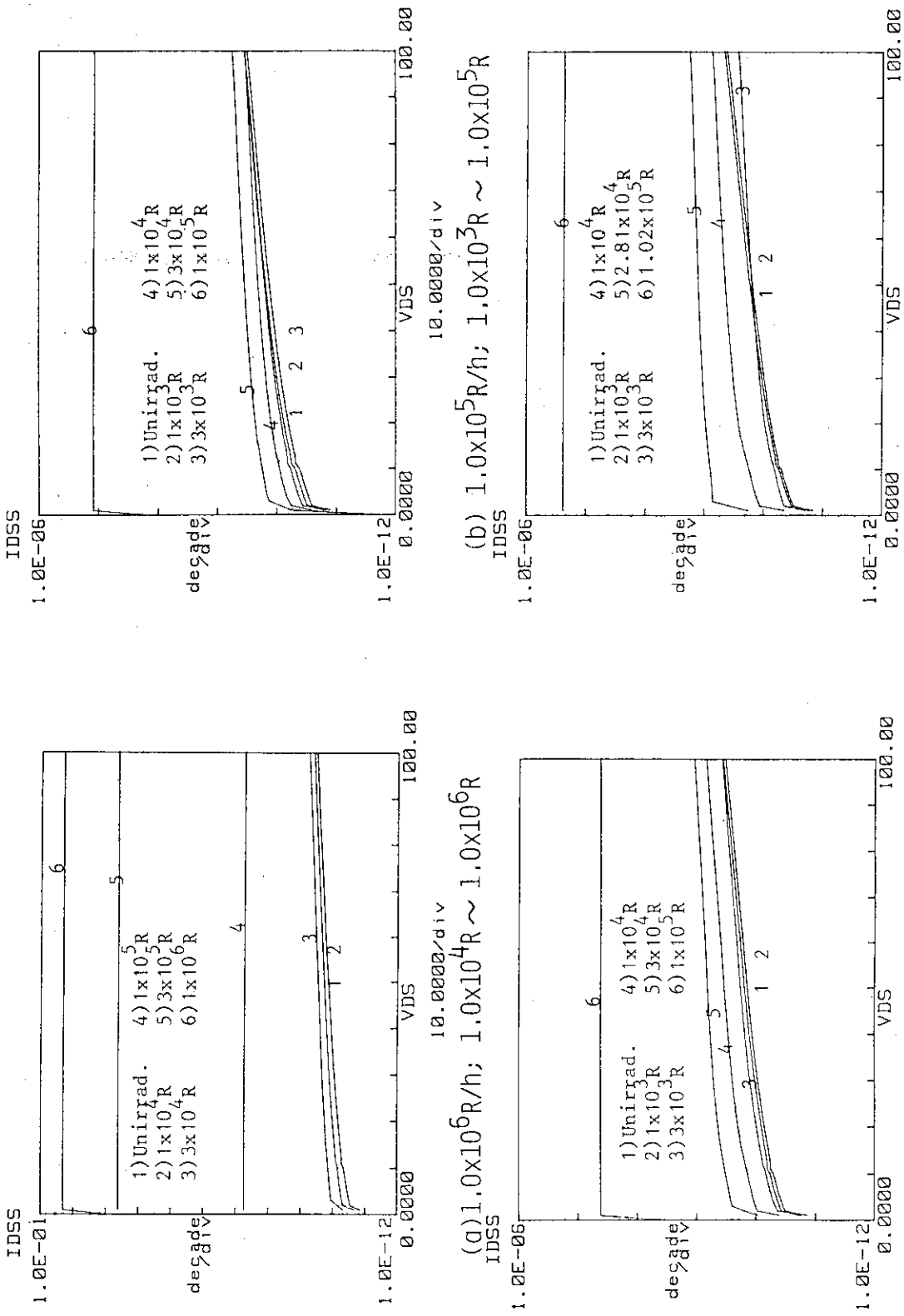


Fig. 3.42 Changes in Leak Current (between Drain and Source ; I_{DSS}) of 2SK458 by γ-ray Irradiation.

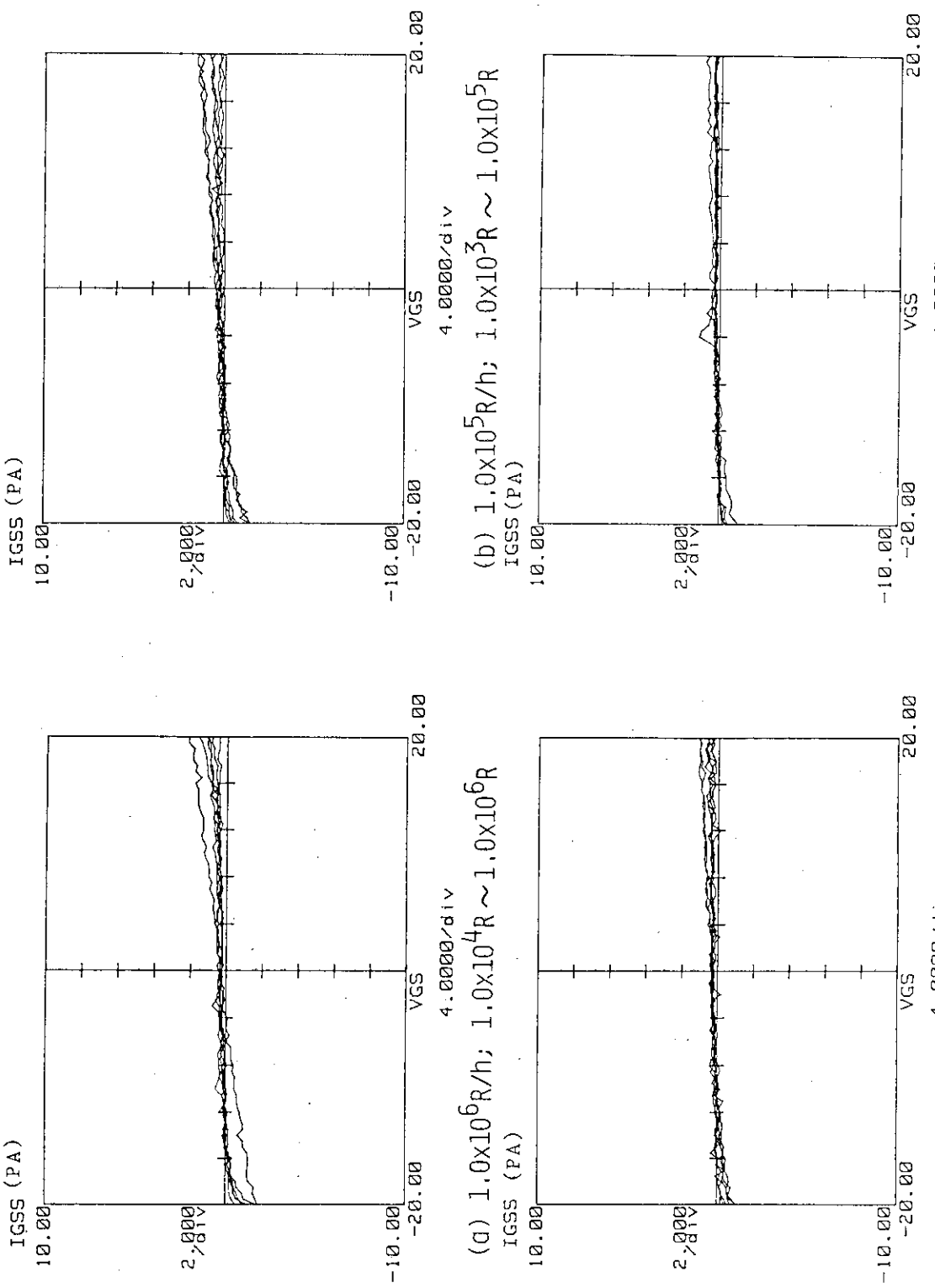


Fig. 3.43 Changes in Leak Current (between Gate and Source ; I_{GSS}) of 2SK458 by γ-ray Irradiation.

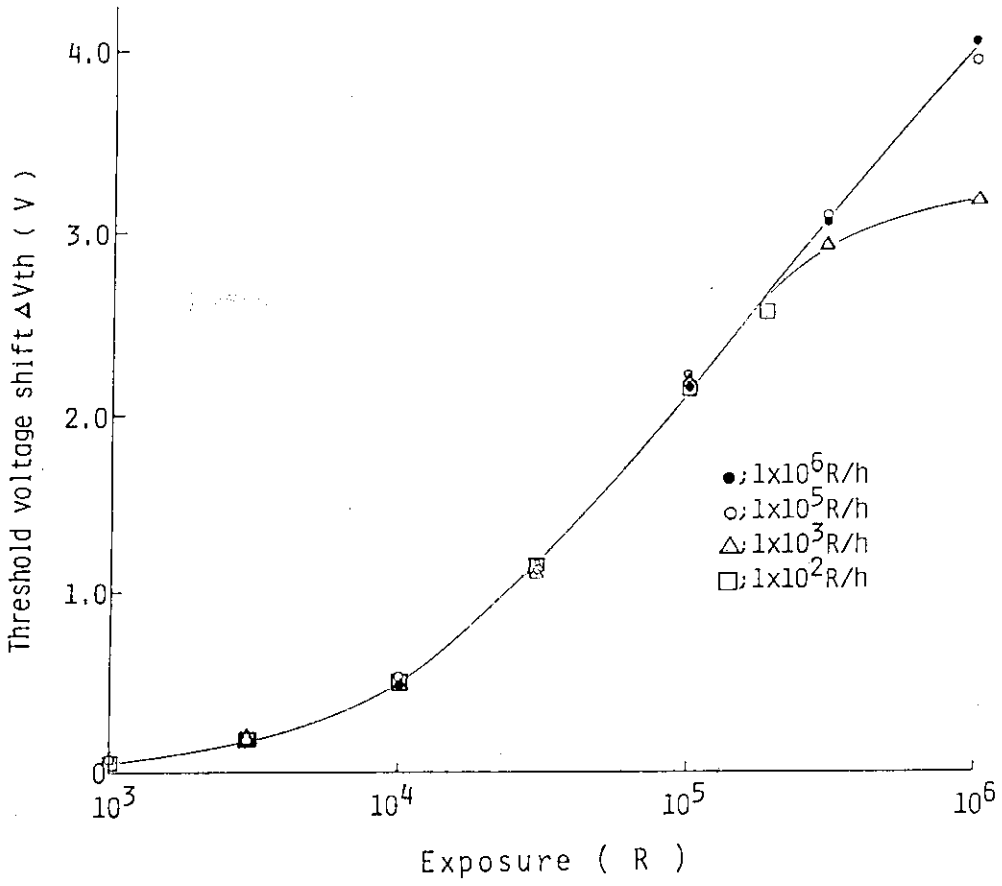


Fig. 3.44 Relationship between Threshold Voltage Shift(ΔV_{th}) of 2SK458 and Exposure.

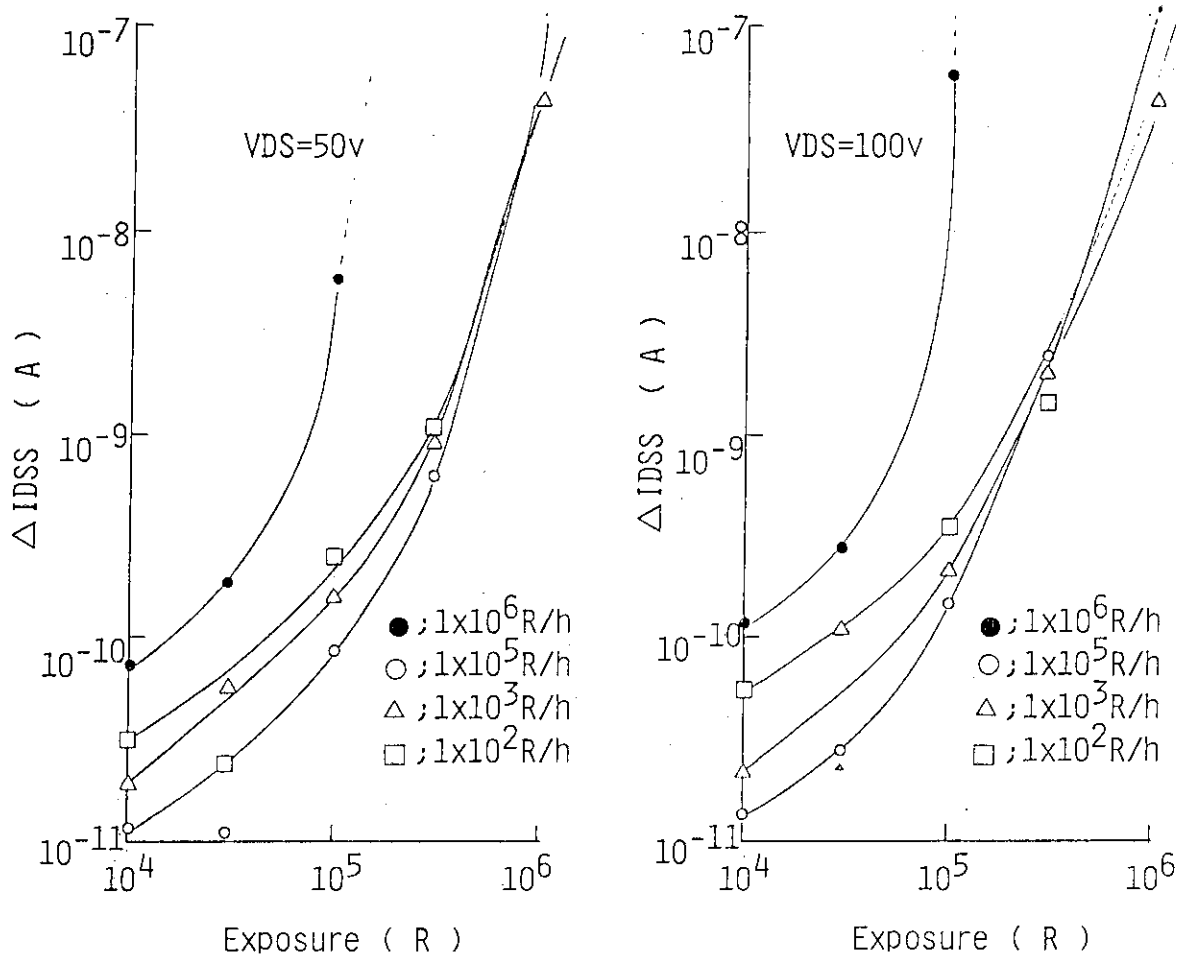
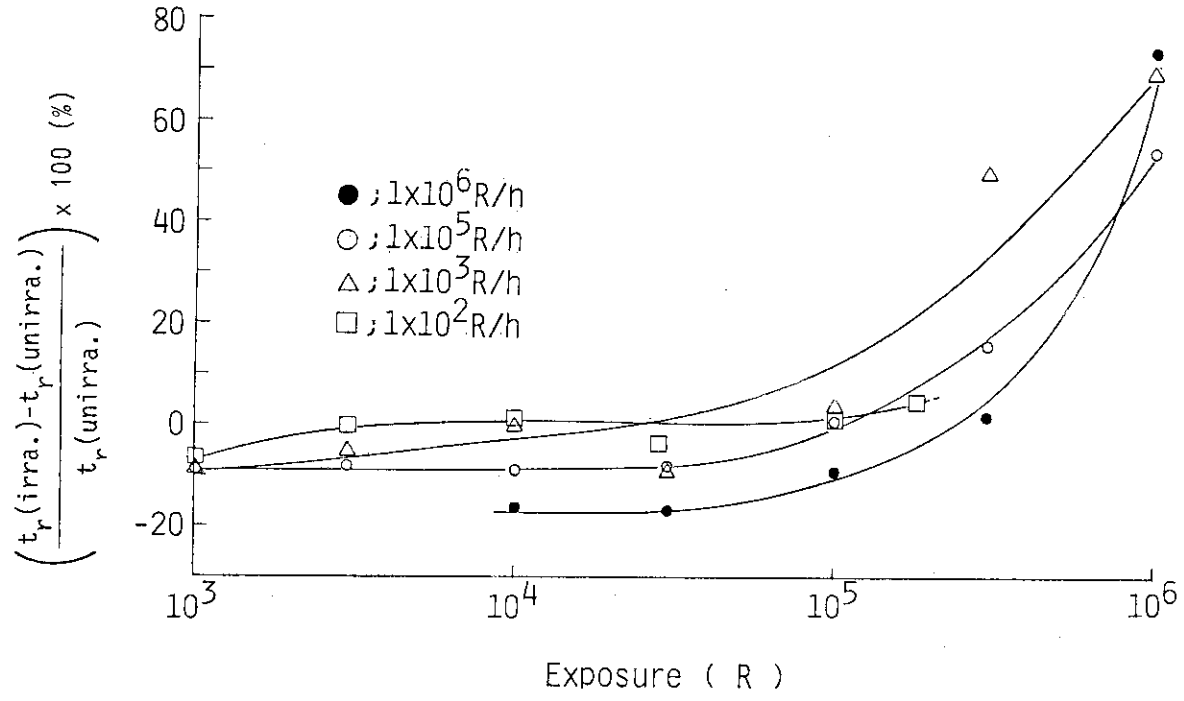
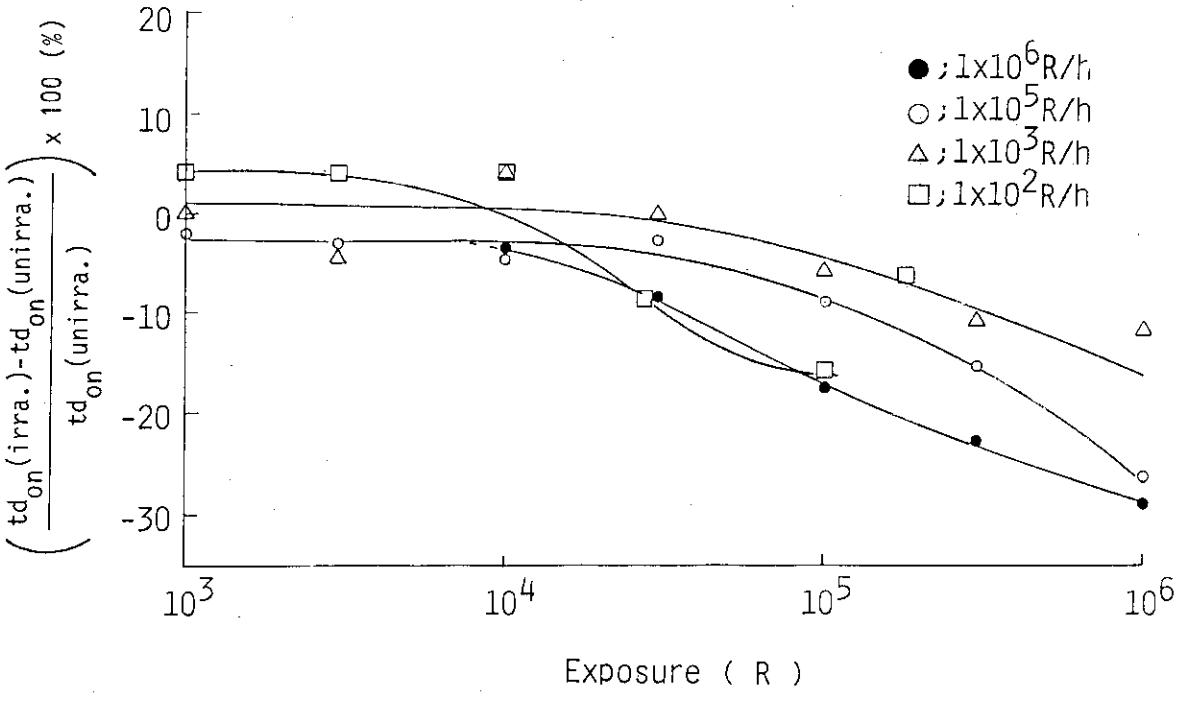


Fig. 3.45 Relationship between Differences in Leak Current (ΔI_{DSS}) of 2SK458 and Exposure.
V_{DS}(Drain to Source Voltage)=50V, V_{DS}=100V

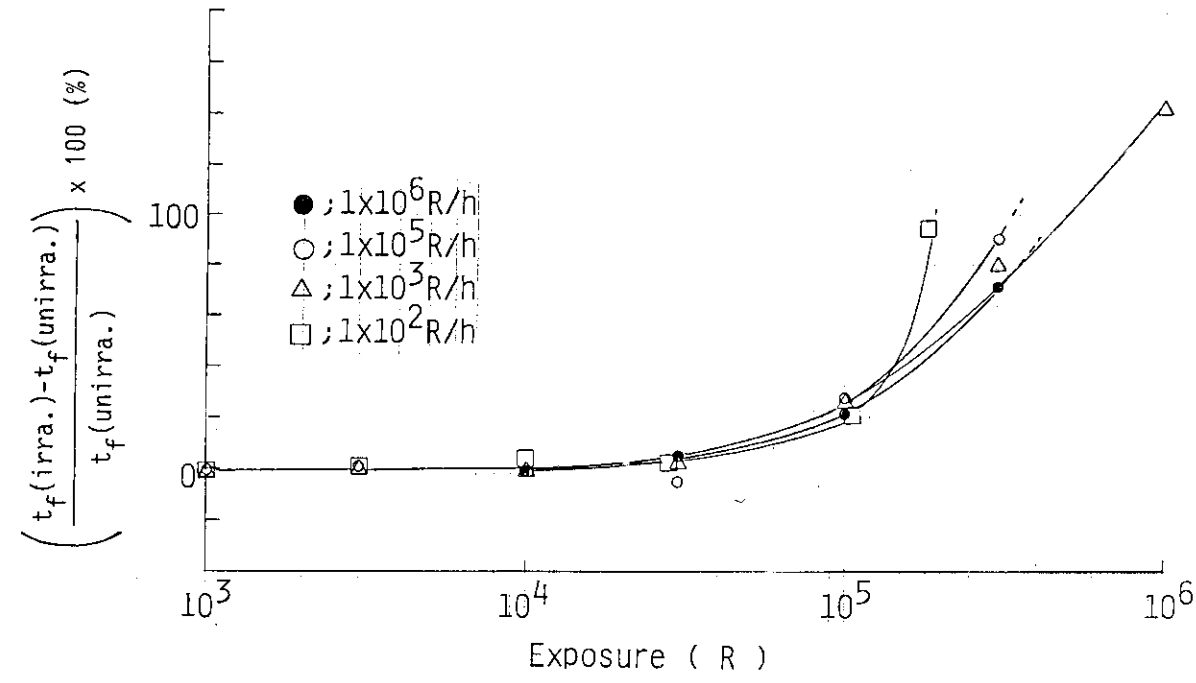


(a) t_r vs. Exposure

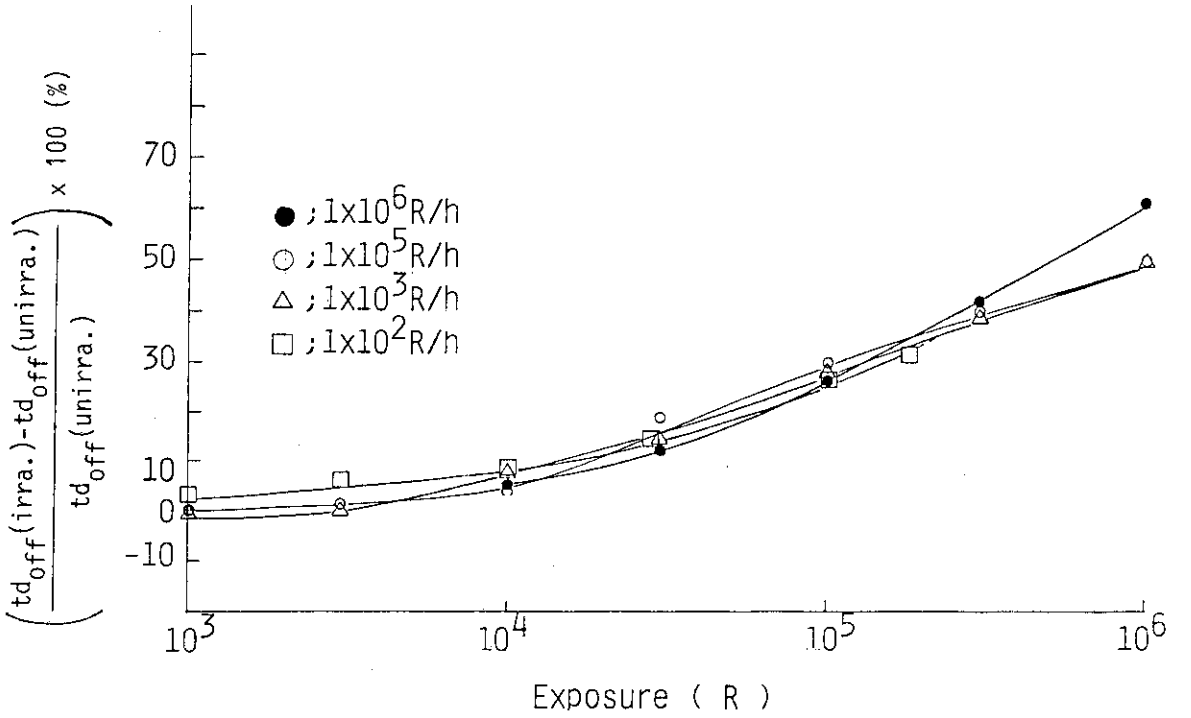


(b) $t_{d(on)}$ vs. Exposure

Fig. 3.46 Relationship between Switching Time(t_r, $t_{d(on)}$) of 2SK458 and Exposure.



(a) t_f vs. Exposure



(b) $t_{d(off)}$ vs. Exposure

Fig. 3.47 Relationship between Switching Time(t_f, $t_{d(off)}$) of 2SK458 and Exposure.

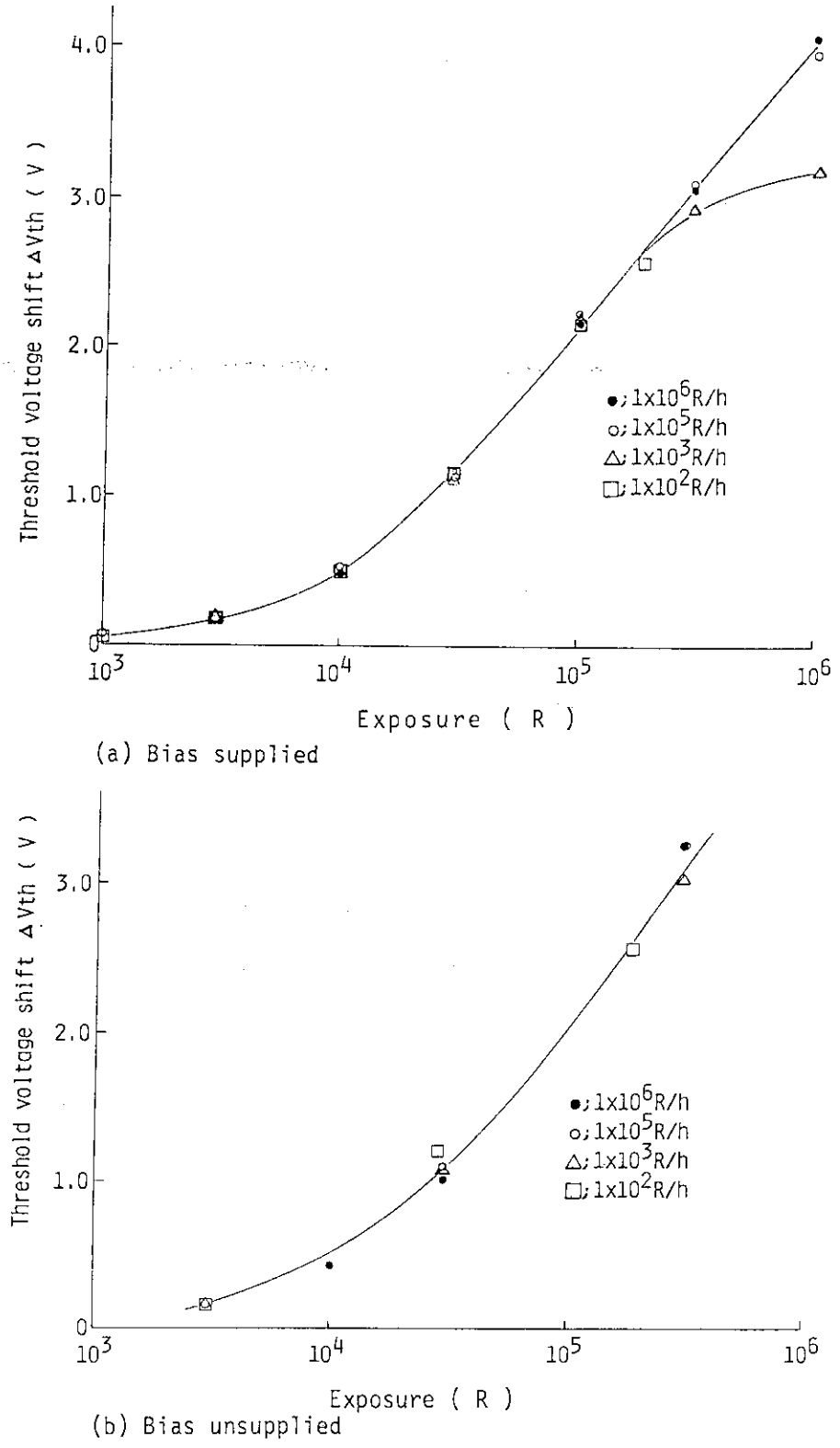


Fig. 3.48 Effect of Bias on Threshold Voltage Shift(ΔV_{th}) of 2SK458 at Various Irradiation Conditions.

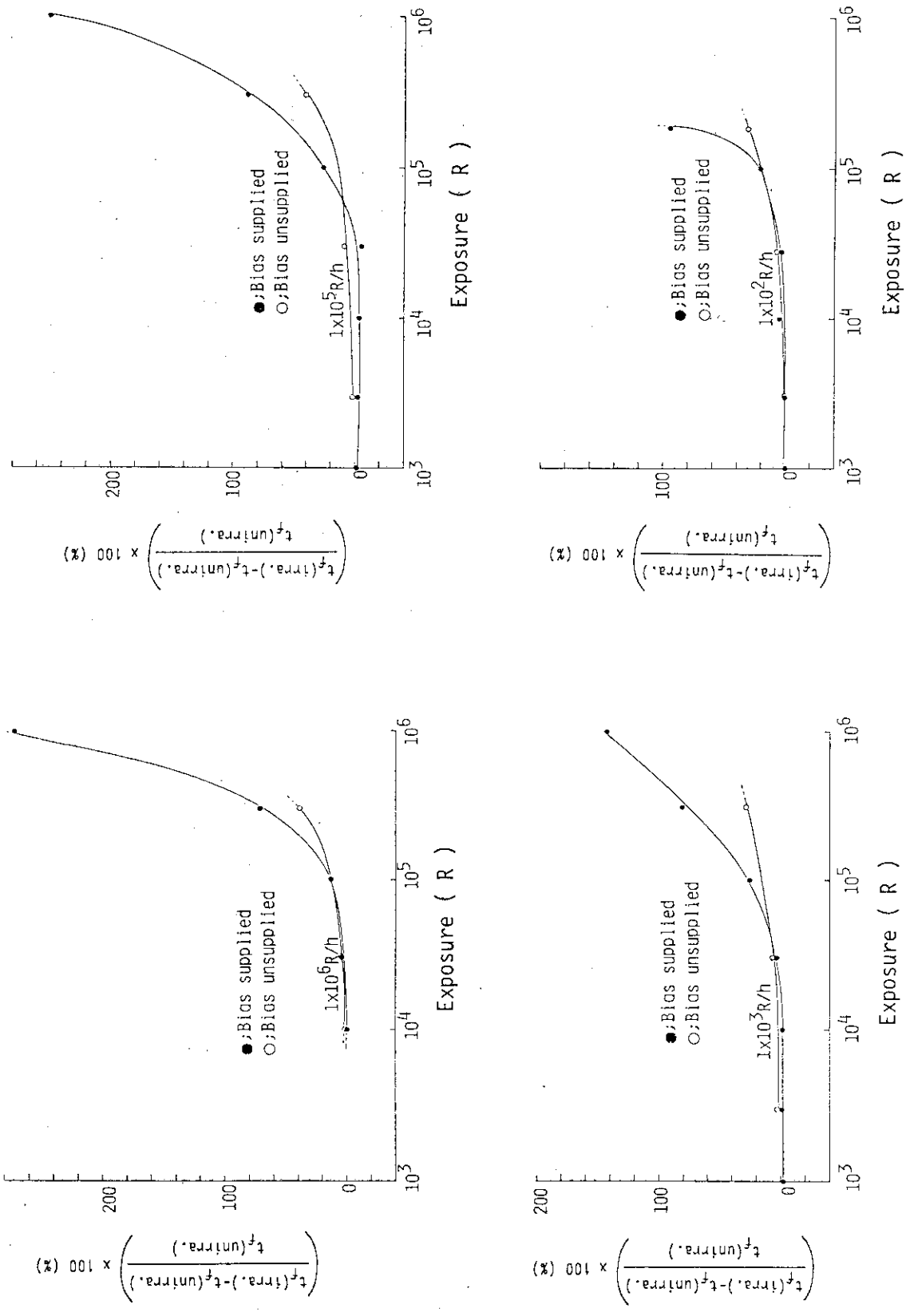


Fig. 3.49 Effect of Bias on Switching Time(t_F) of 2SK458 at Various Irradiation Conditions.

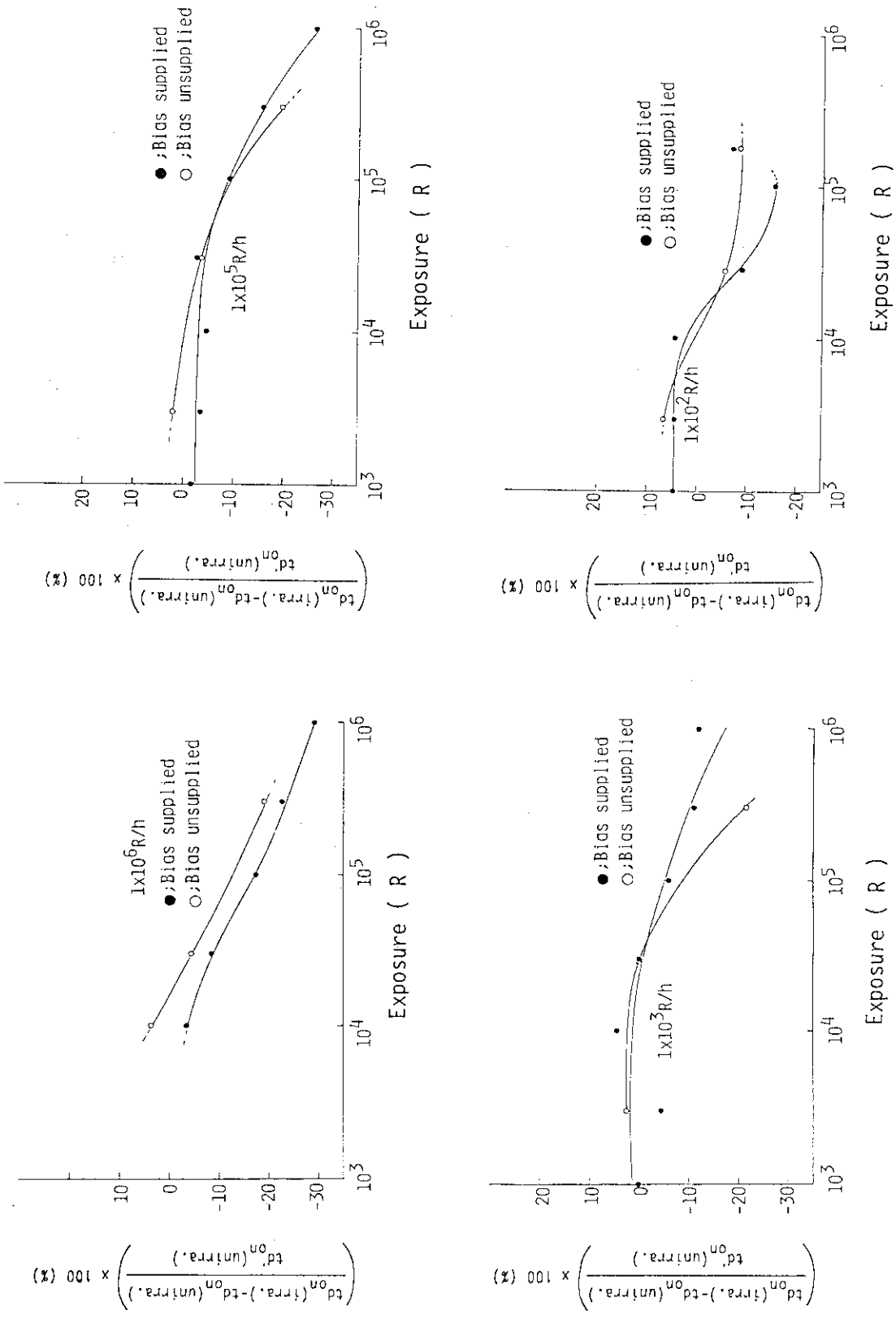


Fig. 3.50 Effect of Bias on Switching Time($t_{d(on)}$) of 2SK458 at Various Irradiation Conditions.

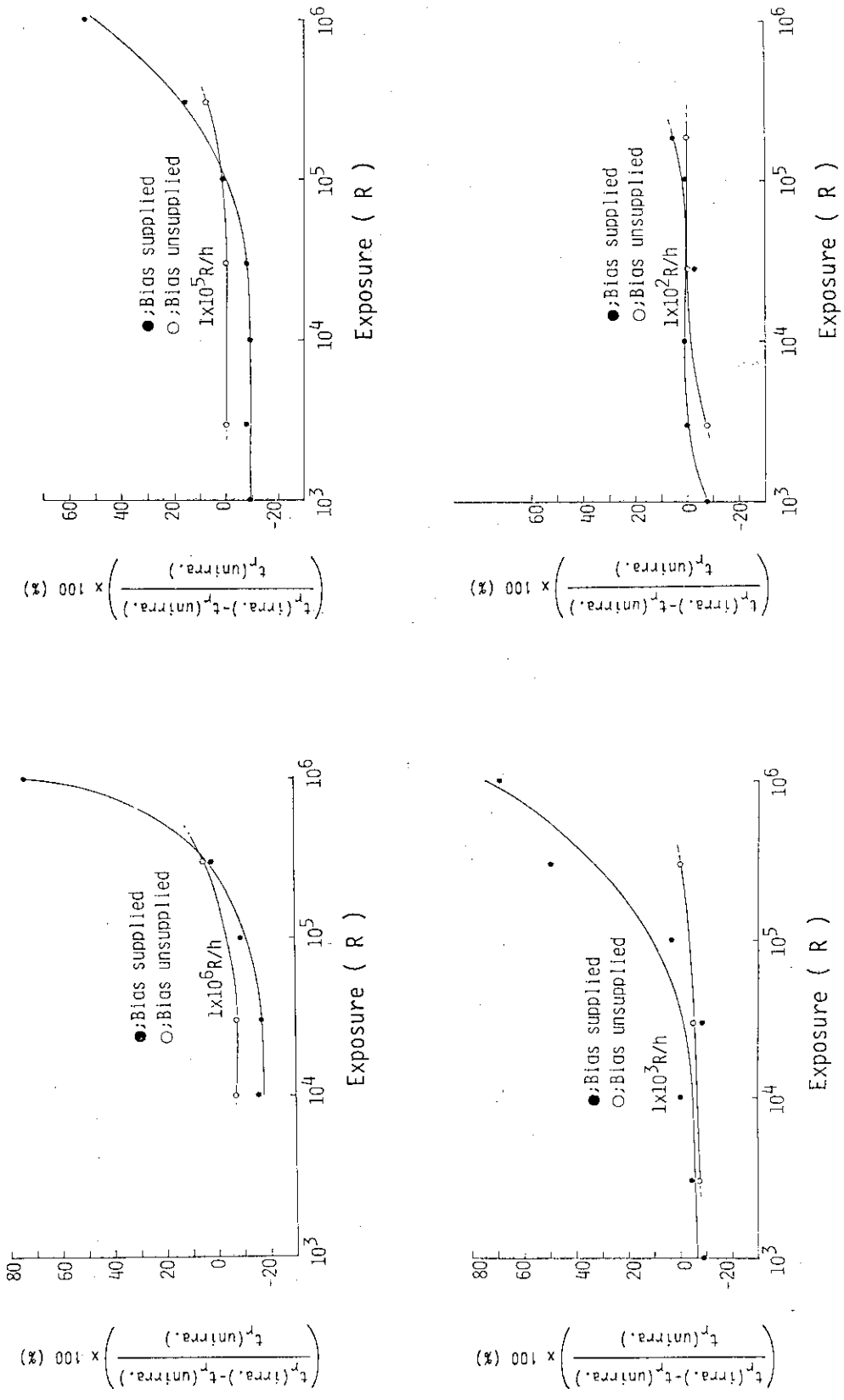


Fig. 3.51 Effect of Bias on Switching Time(t_r) of 2SK458 at Various Irradiation Conditions.

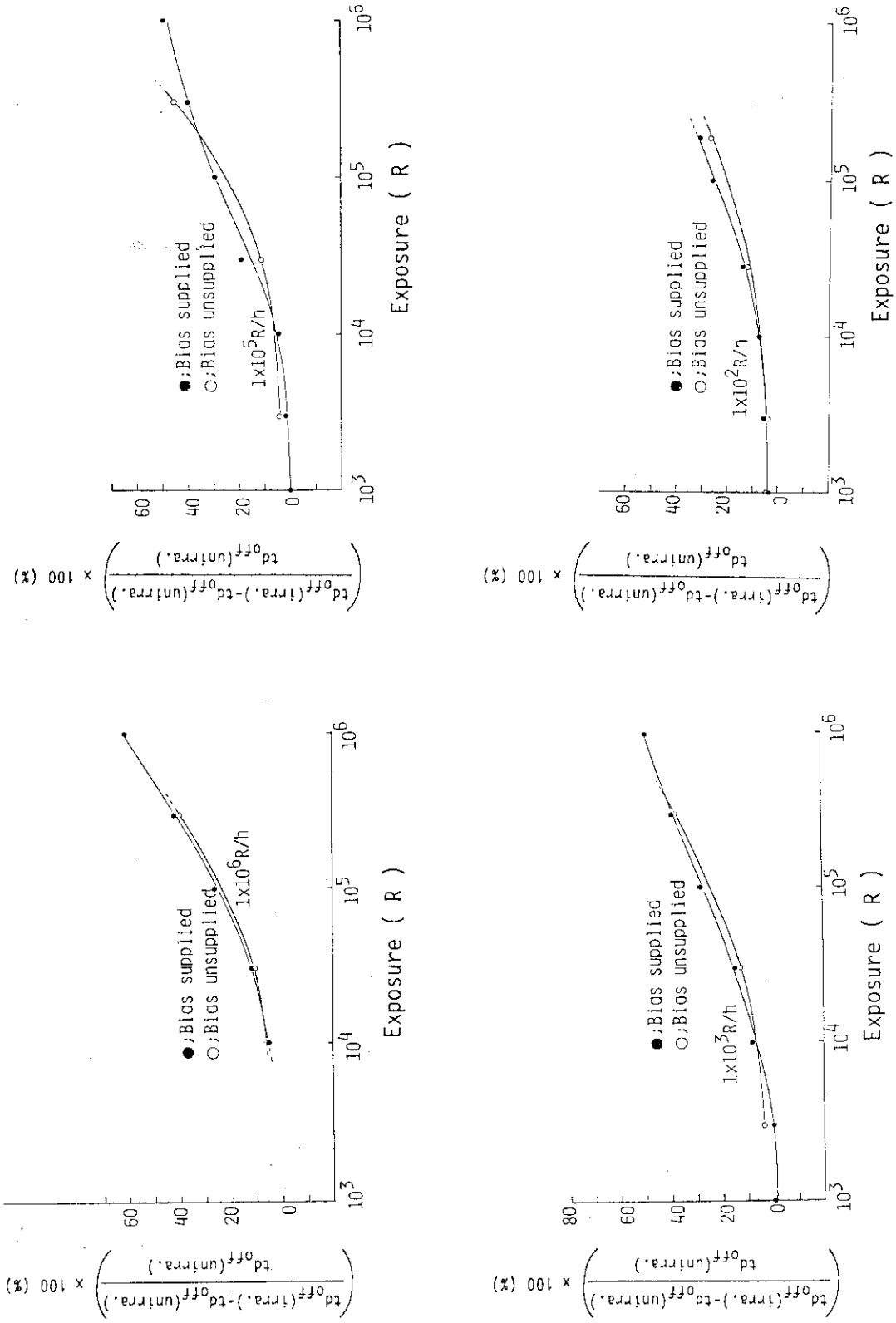


Fig. 3.52 Effect of Bias on Switching Time($t_{d(off)}$) of 2SK458 at Various Irradiation Conditions.

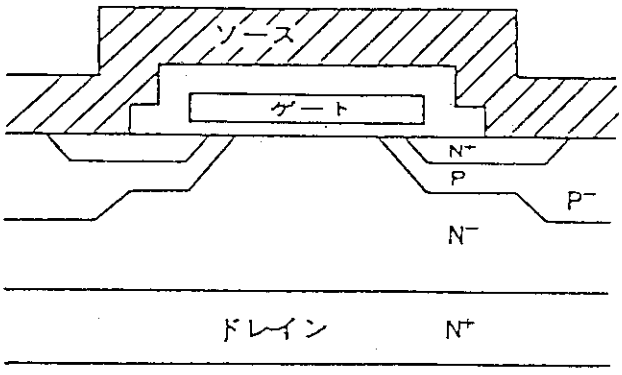


Fig. 3.53 Cross-section of DMOS FET

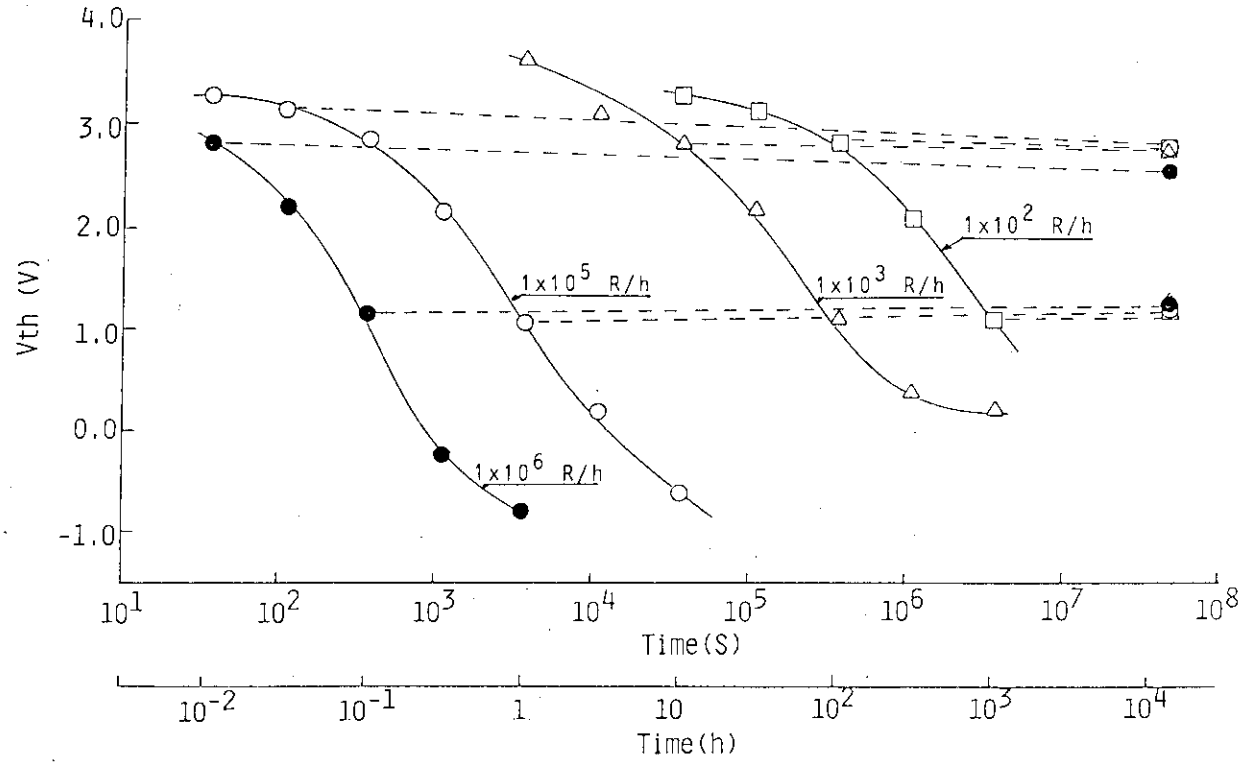


Fig. 3.54 Recovery of Threshold Voltage Shift(V_{th}) at Four Different Exposure Rates for 2SK458.

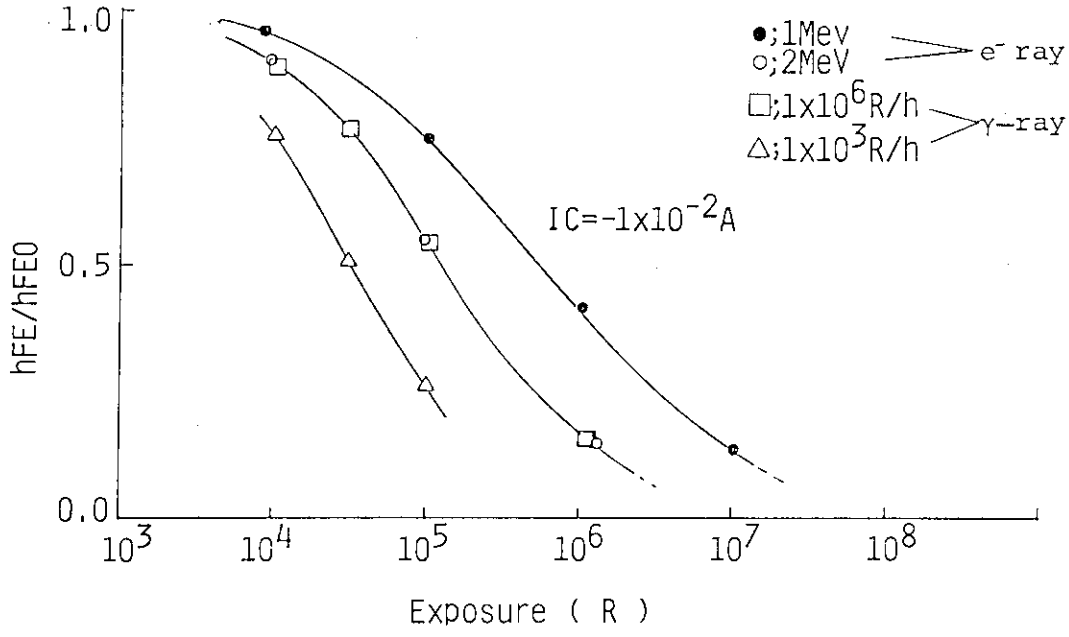
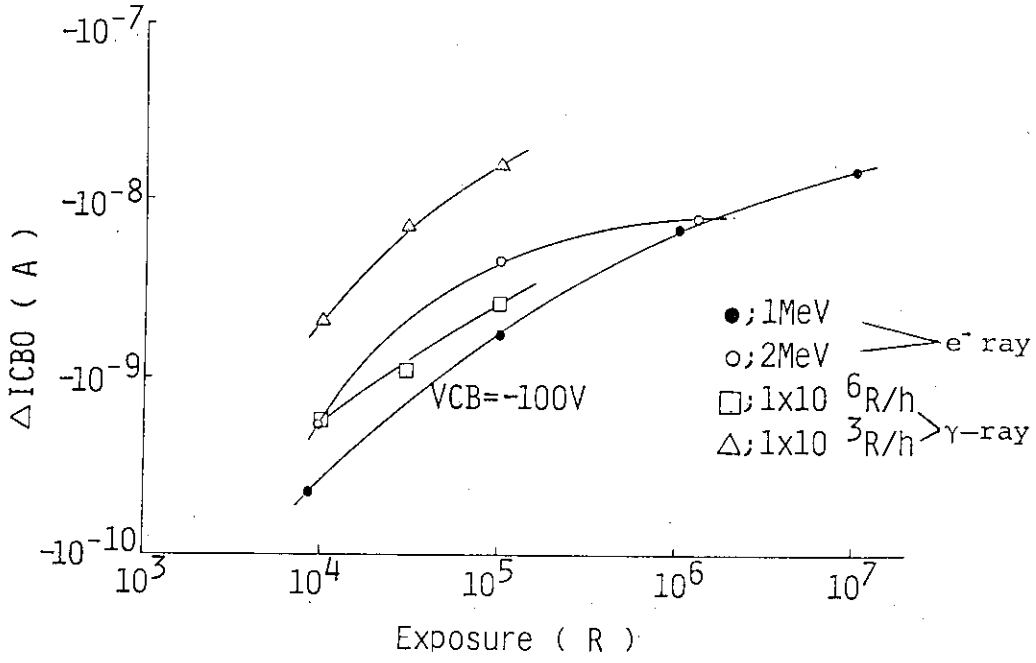
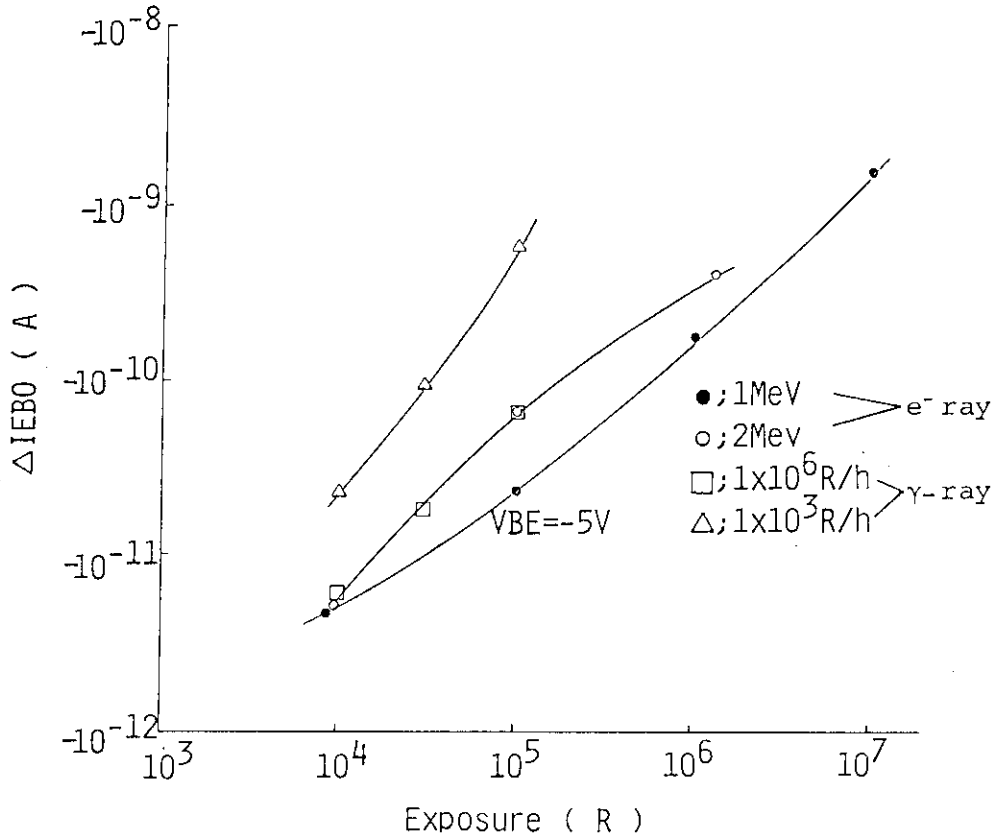


Fig. 3.55 Comparison between h_{FE} of 2SB603 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.



(a) Relationship between ΔI_{CBO} and Exposure



(b) Relationship between ΔI_{EBO} and Exposure

Fig. 3.56 Comparison between ΔI_{CBO}, ΔI_{EBO} of 2SB603 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.

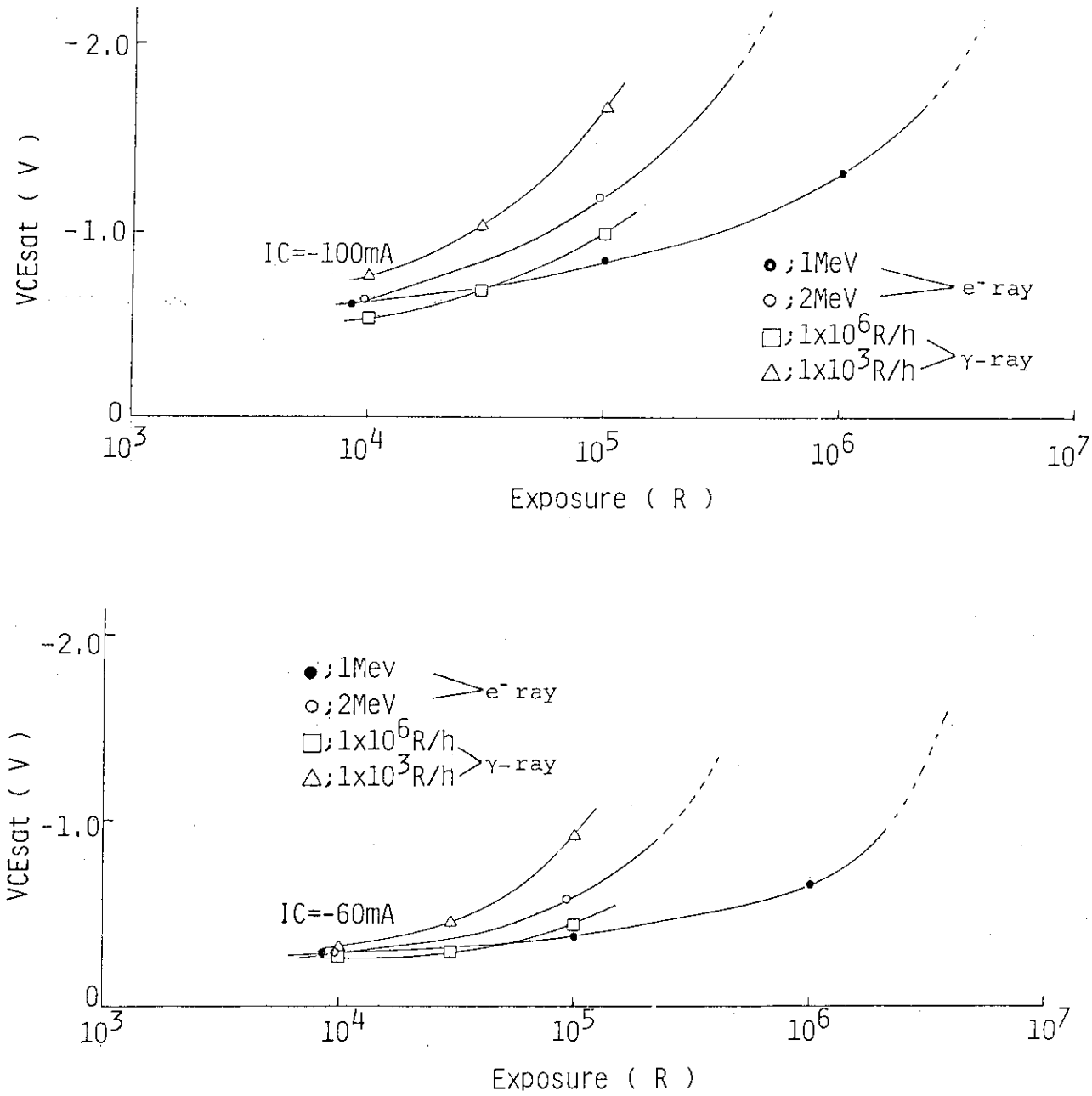


Fig. 3.57 Comparison between $V_{CE(sat)}$ of 2SB603 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.
I_C(Collector current)=-60mA, I_C=-100mA

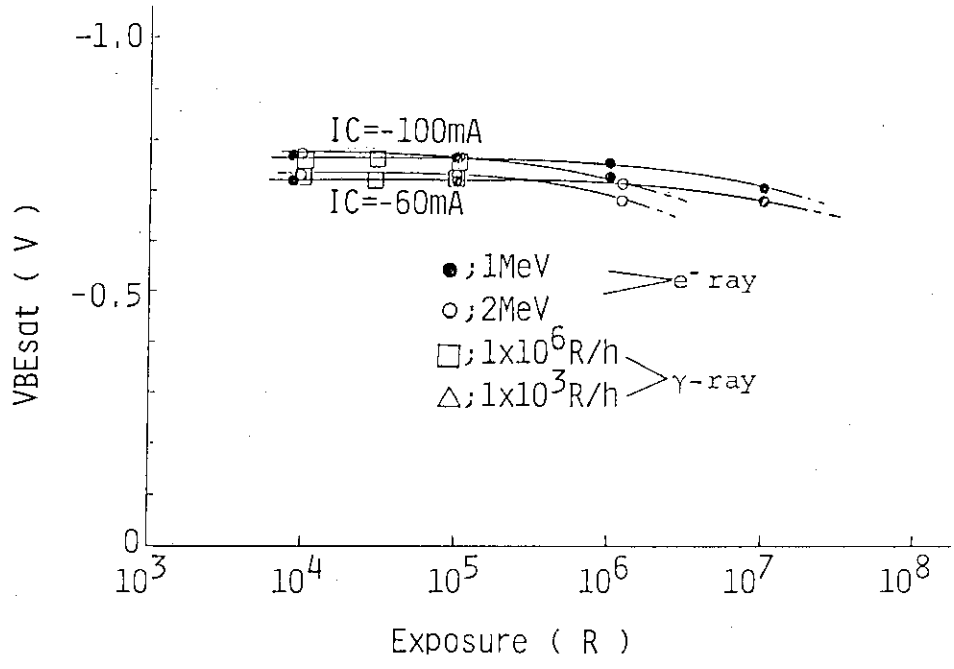
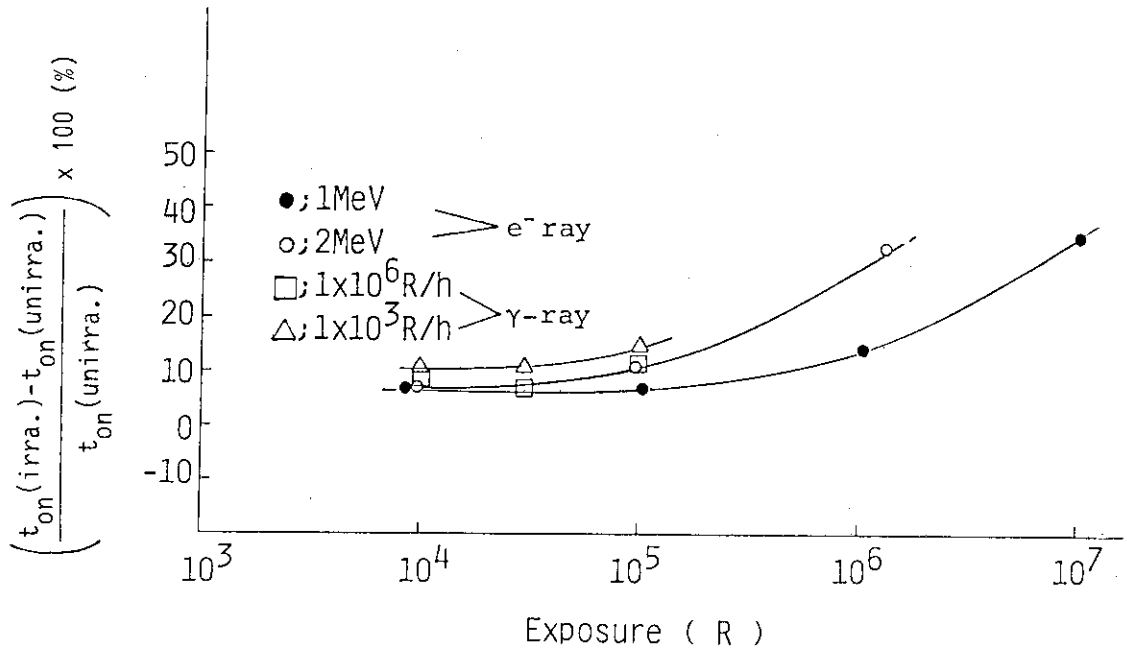
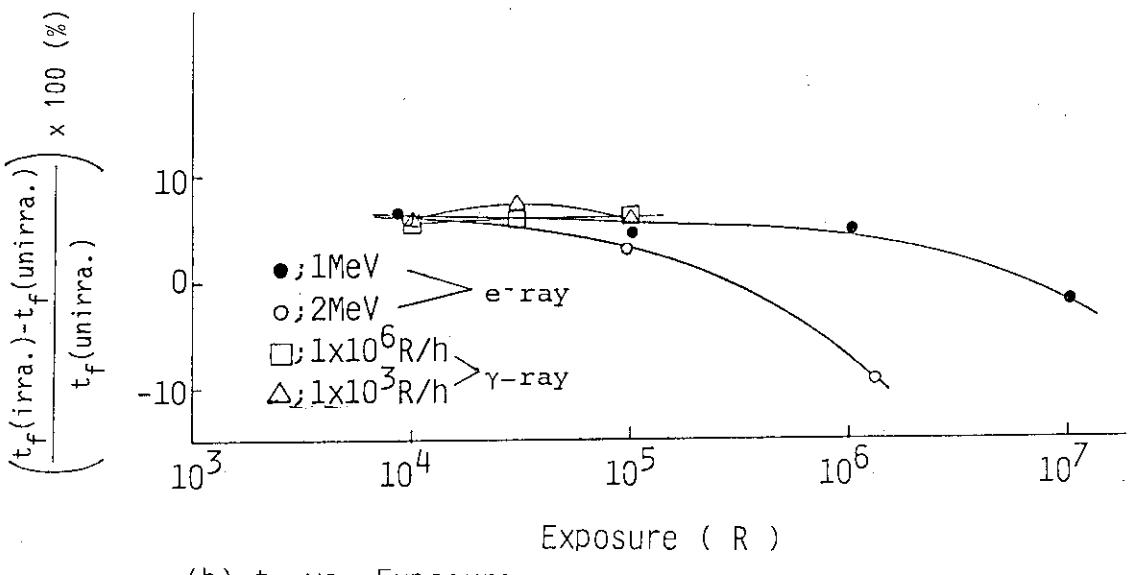


Fig. 3.58 Comparison between $V_{BE(sat)}$ of 2SB603 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.
I_C(Collector current)=-60mA, I_C=-100mA



(a) t_{on} vs. Exposure



(b) t_f vs. Exposure

Fig. 3.59 Comparison between Switching Time(t_{on}, t_f) of 2SB603 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.

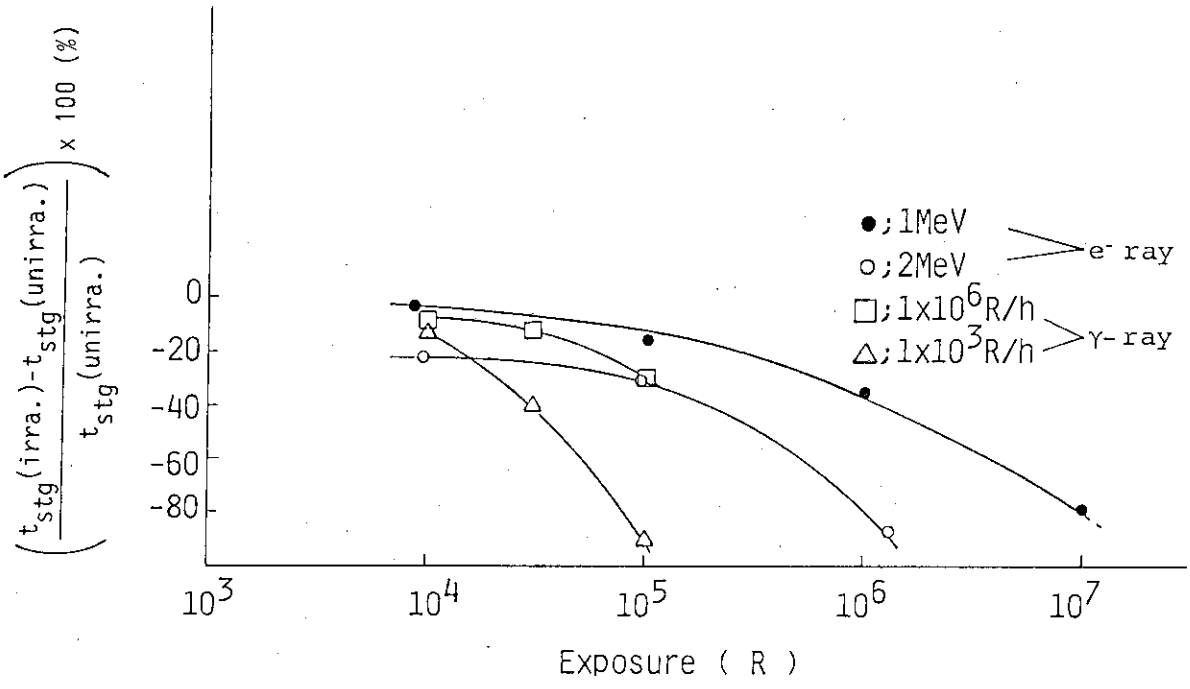


Fig. 3.60 Comparison between Switching Time(t_{stg}) of 2SB603 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.

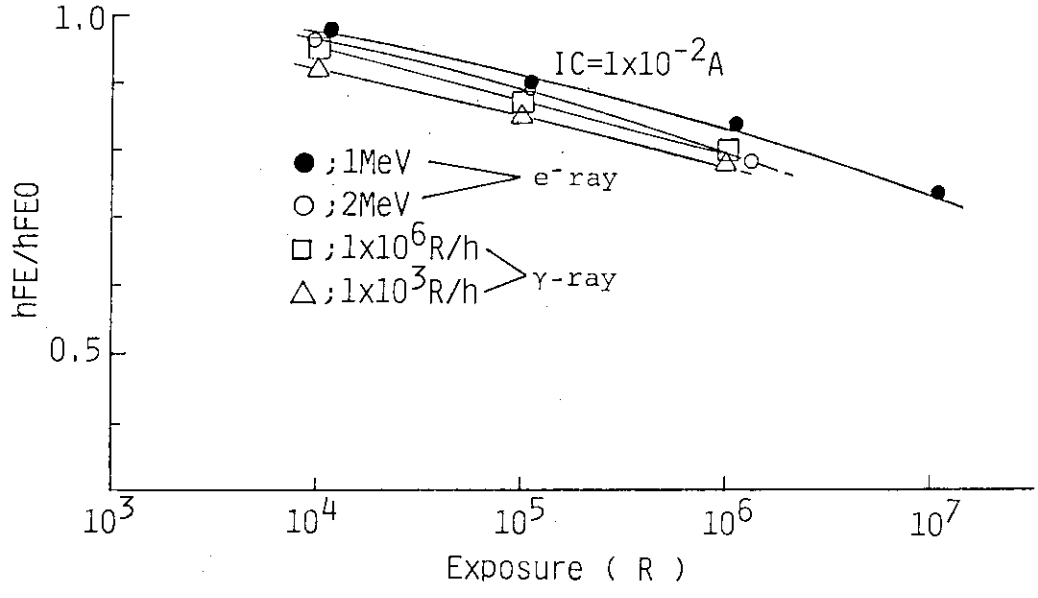
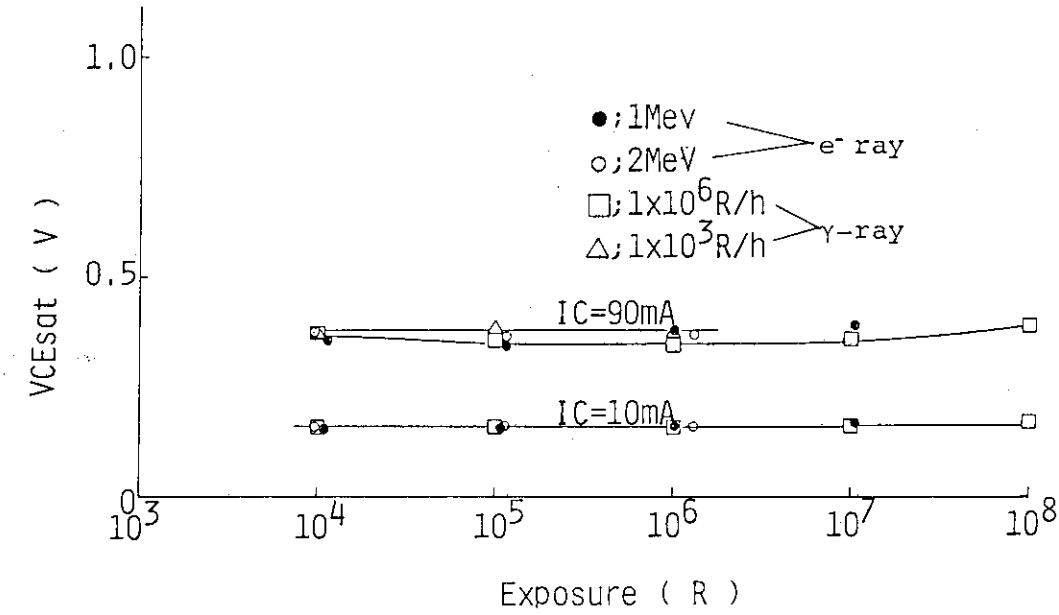
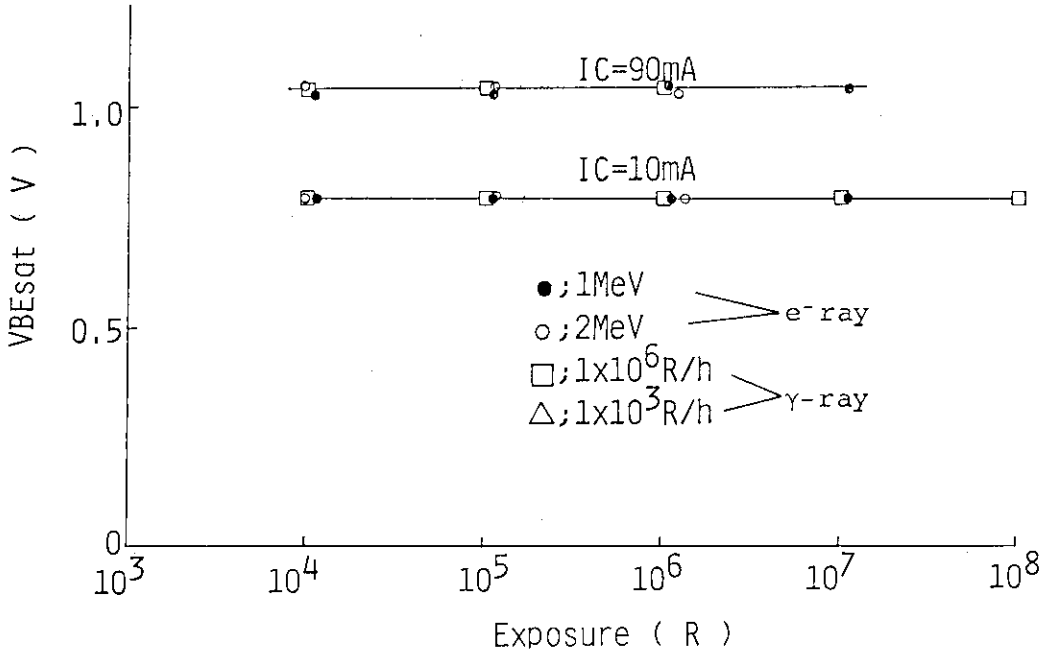


Fig. 3.61 Comparison between h_{FE} of 2SC764 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.

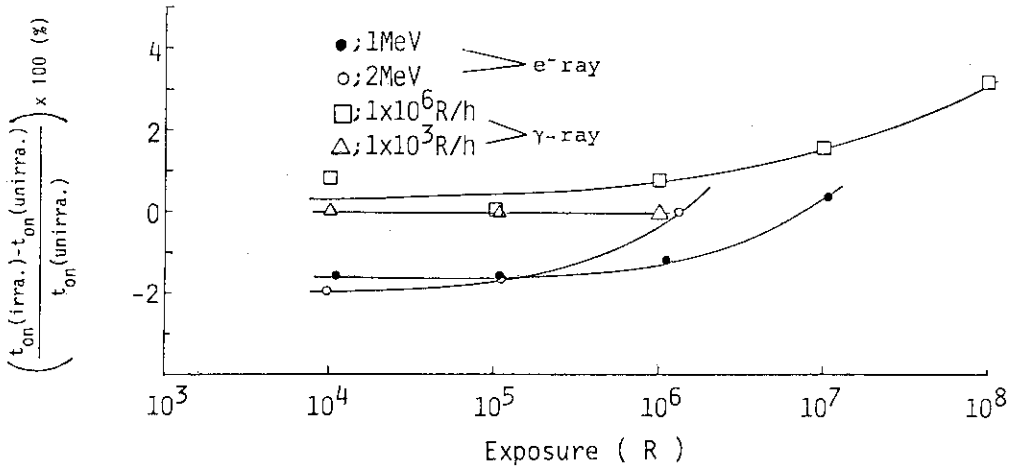


(a) $V_{CE(sat)}$ vs. Exposure

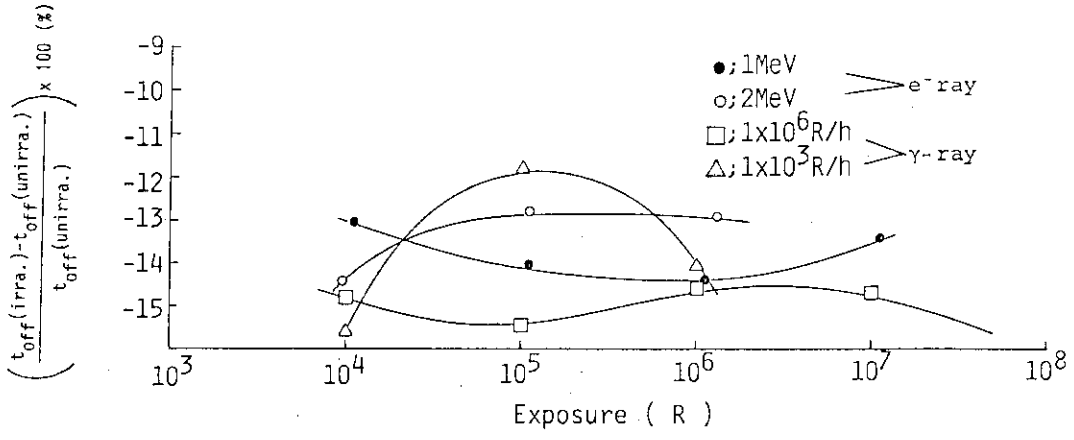


(b) $V_{BE(sat)}$ vs. Exposure

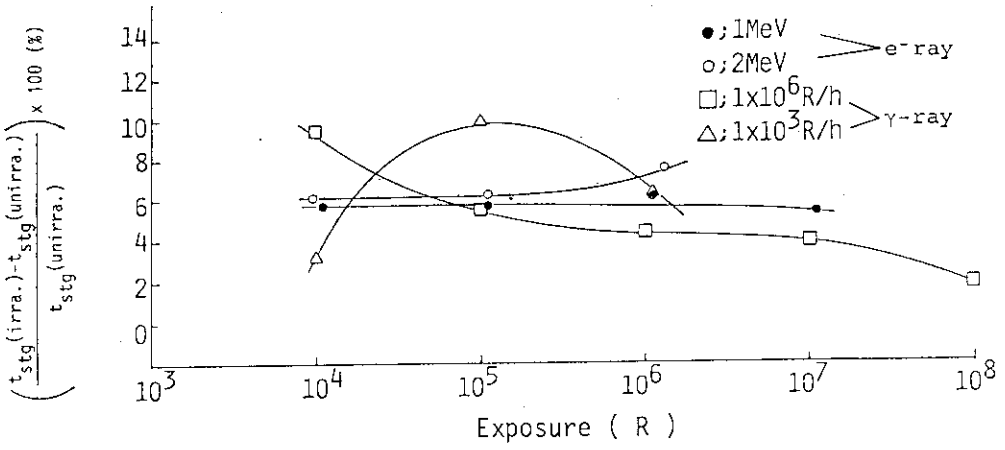
Fig. 3.62 Comparison between $V_{CE(sat)}$, $V_{BE(sat)}$ of 2SC764 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.



(a) t_{on} vs. Exposure



(b) t_{off} vs. Exposure



(c) t_{stg} vs. Exposure

Fig. 3.63 Comparison between Switching Time(t_{on},t_{stg},t_{off}) of 2SC764 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.

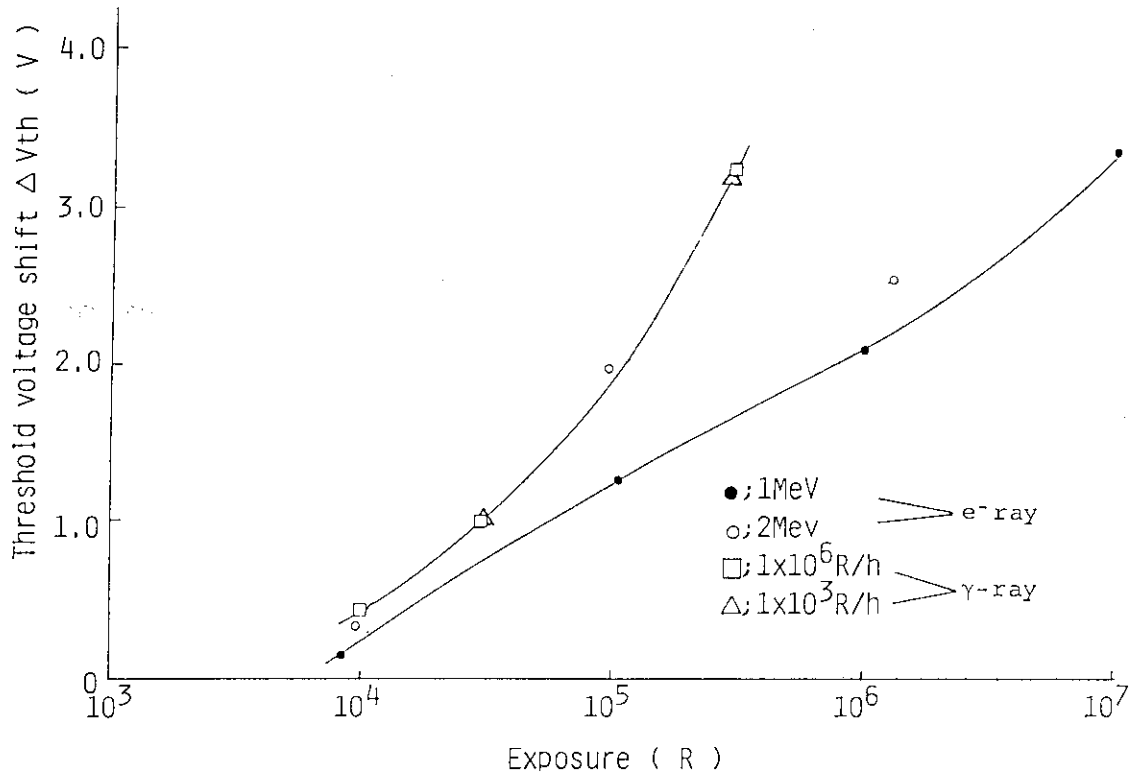
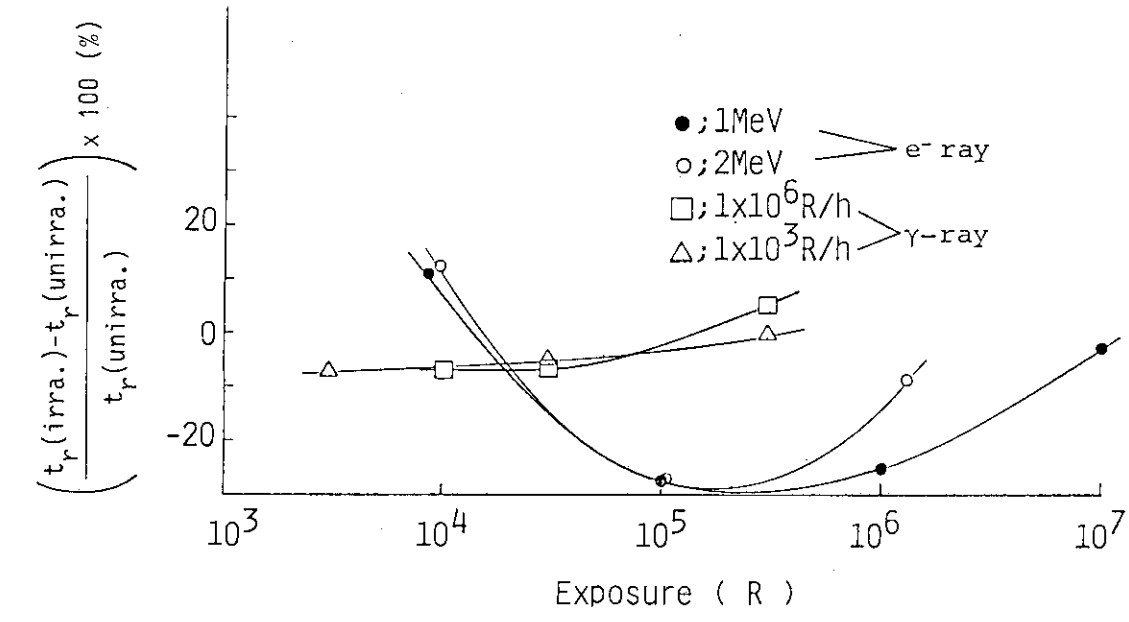
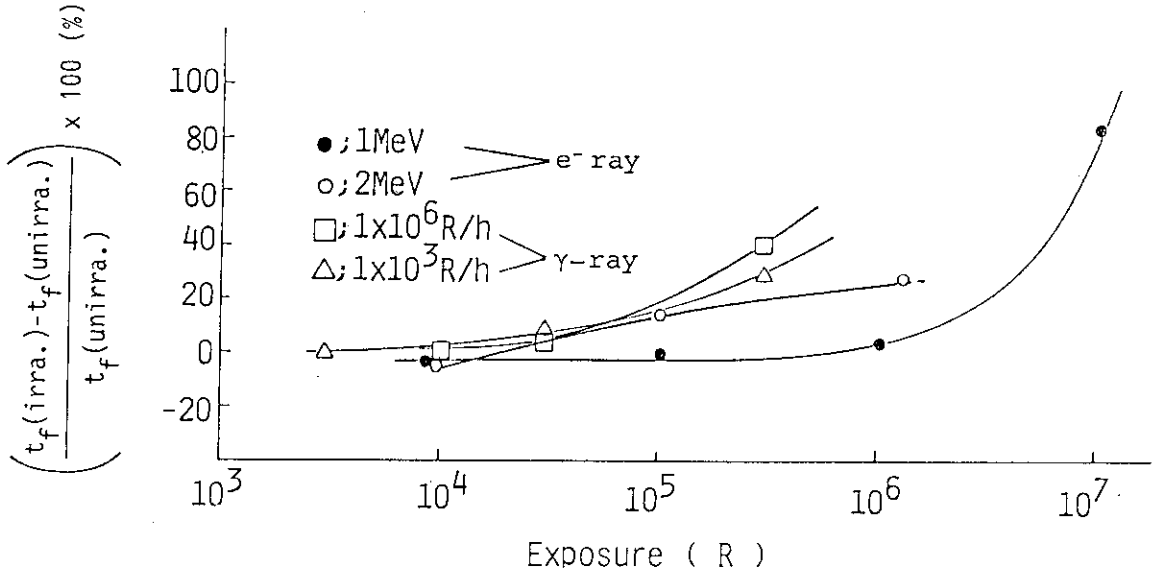


Fig. 3.64 Comparison between Threshold Voltage Shift(ΔV_{th}) of 2SK458 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.

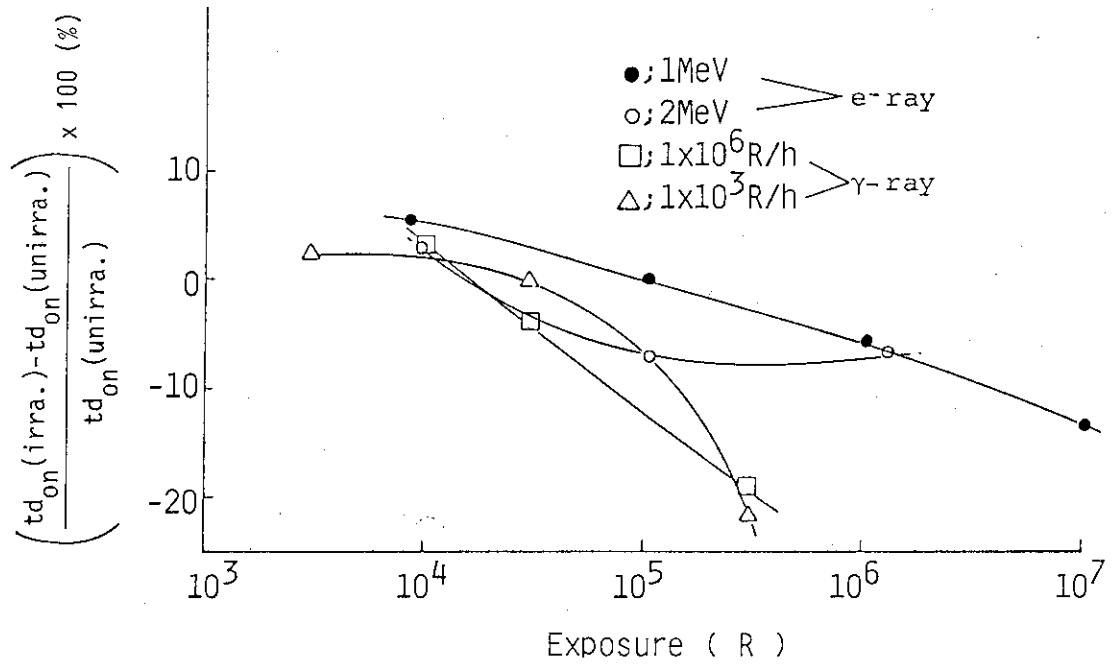


(a) t_r vs. Exposure

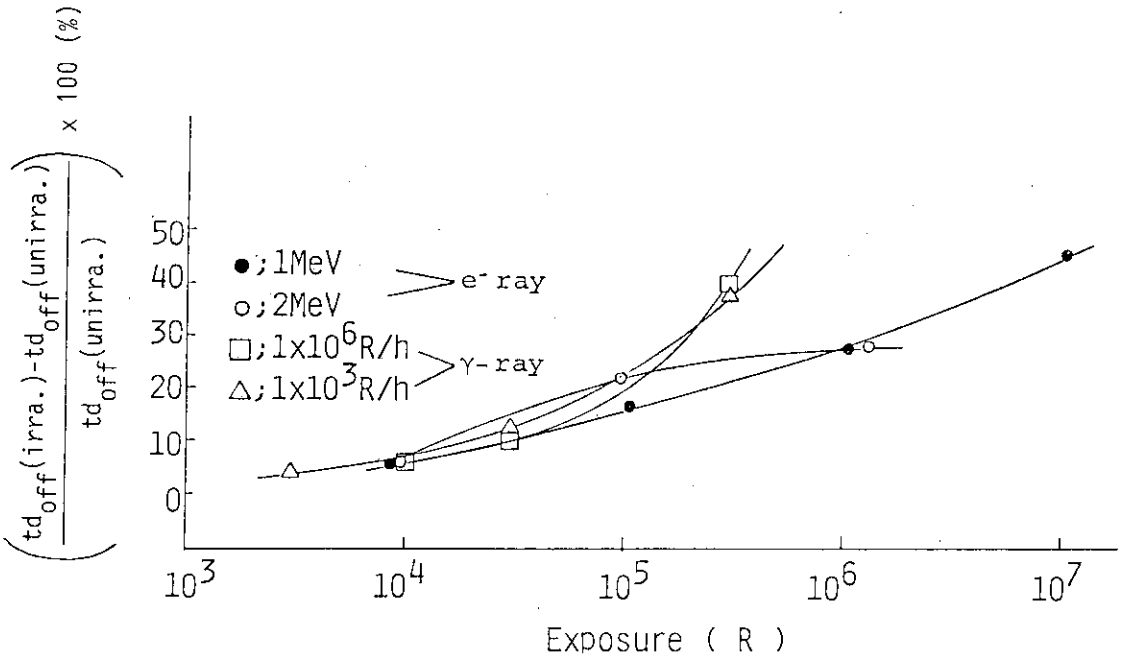


(b) t_f vs. Exposure

Fig. 3.65 Comparison between Switching Time(t_r,t_f) of 2SK458 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.



(a) $t_{d(on)}$ vs. Exposure



(b) $t_{d(off)}$ vs. Exposure

Fig. 3.66 Comparison between Switching Time($t_{d(on)}$,$t_{d(off)}$) of 2SK458 Irradiated by Electron Beam and by γ-ray.

4. トランジスタの照射効果に及ぼす温度の影響

4.1 目　的

本章では，バイポーラトランジスタ（2SB603及び2SC764）及びパワーMOSトランジスタ（2SK458）の照射温度の影響を検討した。また，半導体デバイスが使用されている場合，通常バイアスが加えられる。放射線照射下の半導体デバイスに対して加えられるバイアスは，半導体の劣化に大きな影響があるので試料にバイアスを印加したときの照射温度の影響も合わせて検討した。

4.2 実　験

4.2.1 試料

実験に用いたバイポーラトランジスタ及びMOSトランジスタは，前章(第3章)と同じ2SB603，2SC764及び2SK458の3種類である。前述したように，実験に使用した試料は全て各々一枚のウエハから作成した同一ロットから作られたものである。

4.2.2 線源及び照射方法

照射は日本原子力研究所高崎研究所のRI照射施設棟第1照射室のコバルト60γ線源（8KCi）を用いた。線源形状は高さ45cm，直径15cmの円筒形である。照射線量率は1.1×10^3R／hであり，照射線量は5.0×10^4Rとした。照射線量率の測定にはポリスチレンーアラニン線量計を用いた[18]。照射試料の線量は照射線量表示（単位レントゲン）とした。

照射はバイアス印加回路を内蔵した照射試験治具（第3章，Fig.3.1参照）に試料を取り付けて，－50℃から120℃（±2℃）まで制御できる恒温槽中で行った。バイアス印加回路及びバイアス設定値は第3章（Fig.3.2参照）と同様である。照射温度は－40,－20，0，50，70，100℃の6点としたが，－20及び－40℃の温度では，試料に霜が付着するためバイアス印加は行わなかった。

4.2.3 測定

測定は前述した半導体直流パラメータ解析装置（YHP 4145A）にパーソナルコンピュータ（YHP 216）を組み合わせたシステムを用い，温度23℃湿度55%の恒温恒湿室で行った。

トランジスタ試料はまず照射前に室温（23℃）にて電気特性を測定し，その後，上述の各温度条件にてγ線照射を行った。照射後，10～20分ほど室温乾燥空気中に放置して照射試料を室温に戻し，試料の電気特性を測定した。この測定値を各照射温度での電気特性値とした（すなわち照射のみ温度を変えて行い，測定はすべて室温で行った）。

本実験の測定項目はバイポーラトランジスタが2種類4項目，MOSトランジスタが1種類

5項目の計13種類である。測定項目及び測定範囲は，第3章（Table 3.6参照）に示した。

4.3 実験結果と考察

4.3.1 バイポーラトランジスタの電気特性に及ぼす照射温度の影響

(1) 電流増幅率（h_{FE}）

Fig.4.1及びFig.4.2に2SB603及び2SC764の未照射試料及び－40，0，50，100 ℃の各温度で5×10^4R照射（1.1×10^3R／h，バイアス有り，但し，－40℃の場合はバイアス無し）した各試料について，ベース・エミッタ間電圧V_{BE}に対するベース電流I_B，コレクタ電流I_Cの変化を示す。線量5×10^4Rは前章の線量率効果において，2SB603の$h_{FE}/h_{FE0}=0.5$（Fig.3.6）となる線量である。いずれの照射温度においても，V_{BE}のごく低い値の場合を除き，コレクタ電流I_Cは照射によってほとんど変化しない。これに対し，ベース電流I_Bはいずれの照射温度においても増大する。また，これらの傾向はバイアス有り，無しによって変わらなかった。

Fig.4.3に2SB603及び2SC764の電流増幅率，$h_{FE}=I_C/I_B$，の照射温度依存性を示す。コレクタ電流$I_C=1\times10^{-2}$Aの時の照射後のh_{FE}を未照射時の値で除した変化率（h_{FE}/h_{FE0}）で示した。測定値は5ケの平均値である。2SB603のh_{FE}は明らかに照射温度依存性を示す。すなわち，バイアス無しの場合では，照射温度が－40℃から0℃まで上昇するとh_{FE}が急速に低下し，0℃から50℃まではh_{FE}が徐々に低下する。一方，バイアス有りの場合は，温度70℃よりh_{FE}が徐々に回復する。バイアスを印加したものはしないものよりh_{FE}の低下が5％程度少ないが，照射温度に対する挙動はほとんど変わらない。

2SC764のh_{FE}は，照射温度が高くなるにつれてバイアスの有無にかかわらずh_{FE}は徐々に低下する。バイアスを印加して照射したものは，印加しないものよりもわずかにh_{FE}の値が大きいものもあるが，その挙動に違いはみられずバイアス効果は見られない。

以上のように，照射温度に対する2SB603と2SC764のh_{FE}の変化は異なっている。しかし，上述の$V_{BE}-I_B$及び$V_{BE}-I_C$曲線からバイアスの有無，トランジスタの種類，照射温度にかかわらず，h_{FE}の変化は，いずれのトランジスタにおいても，入力電流I_Bの増加によって生じていることが分かる。すでに述べたように，バイポーラトランジスタの照射劣化はSi/SiO_2界面準位の生成及びベース／エミッタ接合等での界面準位の生成によりベース電流I_Bが増加するためと考えられる。そして，Si/SiO_2界面準位の生成機構として以下のような説が有力である[10),12)]。

放射線照射によって界面に生じたトリバレントシリコン（≡Si・）に，絶縁体中に同じく照射によって生じた正孔が拡散してきてトラップされることによりSi/SiO_2界面準位が生じる。仮に，この説明が正しいとすると，2SB603におけるh_{FE}の－40℃から0℃までの急速な低下は，正孔などが絶縁体中からSi/SiO_2界面のトラップサイト（照射によって生成したトリバレントシリコン等）へ拡散する速度が温度によって速くなり，より多くの界面準位が生成したためと考えられる。なぜなら，①本実験では照射は－40℃～100℃の各温度で行ったが，電気特性の測定は室温で行っている。従って，特性測定時のキャリアの移動度などは変わらない。②照射によるSi/SiO_2界面のトリバレントシリコンや絶縁体中の正孔の生成速度及び生成量はこの程度の温度範囲では変わらないと考えられる。

一方，2SB603の照射温度50℃～100℃のh_{FE}の回復は，例えば，ホットエレクトロン[19]等による界面準位などの熱アニールによると考えられる。照射温度100℃では照射による電気特性の劣化速度よりも回復速度の方が大きくなっている。

2SC764の照射温度によるh_{FE}の変化は，単に温度に対してゆるやかなh_{FE}の減少がみられるだけである。これは，すでに線量率効果で述べたように2SC764の耐放射線性が非常に優れているため，$5x10^4$R照射ではこのトランジスタに照射効果がほとんど現れなかったためと考えられる。このため，単に2SC764の温度効果，すなわち温度によるリーク電流などの増加によるh_{FE}のゆるやかな低下が測定されたと思われる。2SC764については，前述したように$1x10^8$R程度照射すれば2SB603と同様な照射温度効果が認められるかも知れない。

(2) 逆方向飽和電流（I_{CBO}及びI_{EBO}）及び飽和電圧（$V_{BE(sat)}$及び$V_{CE(sat)}$）

Fig.4.4及びFig.4.5に2SB603及び2SC764のコレクタ・ベース逆方向飽和電流I_{CBO}及びエミッタ・ベース逆方向飽和電流I_{EBO}の照射温度依存性を示す。各測定における5ケの測定点に多少のバラつきが認められたので，平均値ではなく測定値をそのままプロットした。I_{CBO}とI_{EBO}は各接合ダイオードの逆方向電流に相当するので，いずれのトランジスタにおいても照射温度に対してほぼ同一の変化を示した。すなわち，2SB603ではI_{CBO}及びI_{EBO}は照射温度に対し50～70℃にゆるやかなピークをもつ曲線となった。しかし，I_{EBO}の方がより明瞭なピークを示す。

2SC764ではI_{CBO}及びI_{EBO}に照射温度依存性はほとんど認められなかった。また，いずれのトランジスタにおいてもこれらの特性のバイアス依存性は認められない。

逆方向飽和電流の増加する原因はh_{FE}の低下の原因と同じSi／SiO_2界面準位等によるものであることから，I_{CBO}，I_{EBO}の照射温度による変化については上述したh_{FE}の照射温度による変化と同様のことが考えられる。

Fig.4.6に2SB603及び2SC764のエミッタ及びコレクタ飽和電圧（$V_{BE(sat)}$，$V_{CE(sat)}$）の照射温度依存性を示す。5ケの測定値をそのままプロットした。$V_{BE(sat)}$は両トランジスタとも照射温度によらずほぼ一定であるが，2SB603の$V_{CE(sat)}$はI_{CBO}やI_{EBO}と同様に照射温度50～70℃に緩やかなピークをもつ曲線となった。また，$V_{CE(sat)} = V_{BE(sat)} + V_{BC(sat)}$であり，$V_{BE(sat)}$は一定であることから，$V_{BC(sat)}$が照射温度により変化していることが分かる。すなわち，コレクタあるいはコレクタ／ベース接合の抵抗値が照射温度によって上述のような変化をしていると考えられる。すでに，線量率効果のところで述べたように，エミッタ／ベース接合とコレクタ／ベース接合とは不純物濃度及び接合部面積に違いがある。特に不純物濃度はエミッタ／ベース接合の方が高く，このことが$V_{BE(sat)}$の照射温度依存性がほとんど認められない理由であろう。$V_{CE(sat)}$の照射温度効果については，前述したh_{FE}の照射温度効果と同様のことが考えられる。

(3) スイッチング時間

Fig.4.7及びFig.4.8に2SB603及び2SC764のスイッチング時間（ターンオン時間t_{on}，蓄積時間t_{stg}，ターンオフ時間t_{off}）の照射温度依存性を示す。バイアスを印加した場合としない場合について，照射後の値から初期値を引いたものを初期値で除した変化率を照射温度に対してプロットした（5ケの測定値）。2SB603 t_{on}及びt_{off}は前者が平均約15％，後者が平均約5％程度増加したが，いずれも照射温度依存性は認められない。これに対し，蓄積時間t_{stg}は照射温度が高くなるにつれて単調に減少する。

2SC764のt_{on}，t_{stg}，t_{off}は平均して各々約－2％，6％，－15％，初期値よりずれているが，いずれも照射温度依存性は認められない。また，2SB603，2SC764共にバイアスの効果はほとんど認められない。すでに述べたようにバイポーラトランジスタのスイッチング時間の変化は絶縁体中の固定電荷やSi／SiO_2界面準位の影響よりもシリコン結晶中の欠陥準位等の影響を受けると考えられた。そして，t_{on}は遅延時間と上昇時間の和であり，遅延時間はエミッタ接合が逆方向から順方向にバイアスされるまでの時間，上昇時間はベース領域内にキャリアの勾配を発生させコレクタ側へキャリアを注入し，同時にベース領域内の再結合電流を供給するのに必要な時間である。t_{off}はt_{on}と同じ作用が逆に進行している。t_{stg}は主にベース領域の少数キャリアのライフタイムの長さに依存しており，ベース領域内少数キャリアのコレクタ領域への到達量の関数であるhFEとは密接な関係がある。

温度を変えて照射すると，2SB603のt_{on}，t_{off}及び2SC764のt_{on}，t_{stg}，t_{off}は初期値に対して2～15％値がずれるが，測定誤差を考えると照射効果はきわめて少ない。これに対し，2SB603のt_{stg}は照射温度が高くなるに従って明らかに低下しており，これは高い温度での照射ほどシリコン結晶中に深い準位の欠陥がより多く生成していると考えられる。

4.3.2 ＭＯＳトランジスタ電気持性に及ぼす照射温度の影響

(1) しきい値電圧

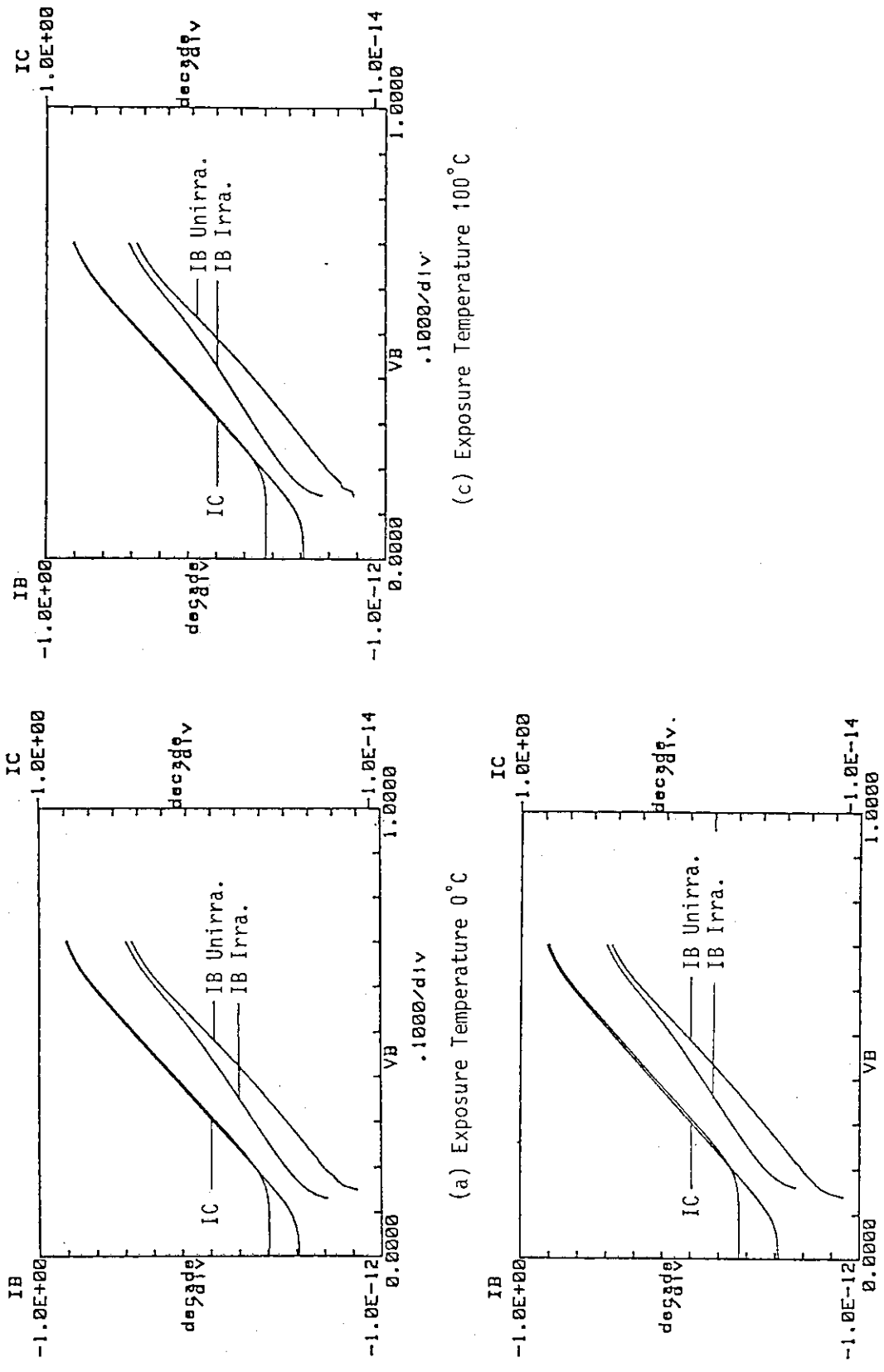
Fig. 4.9にパワーＭＯＳトランジスタ2SK458のしきい値電圧の照射温度による変化を示す。図中(a)は未照射試料及び100℃照射後，室温で測定した試料のゲート電圧とドレイン電流の関係である。加熱照射によって，しきい値電圧が単に負電圧側に平行移動するだけで，ドレイン電流の曲線の傾きは変わらない。このことから，2SK458の照射温度効果はすでに線量率効果のところで述べたように，ＭＯＳ構造の酸化膜中にトラップされた正孔の蓄積によるものであり，Si／SiO_2界面準位の影響はほとんど認められないことが分かる。これはすでに述べたように，2SK458のＭＯＳ構造に起因していると考えられる。図(b)に2SK458ＭＯＳトランジスタのしきい値電圧の照射温度依存性を示す。しきい値電圧はバイアス有無に係わらず照射によって1.5Ｖ程度の変化を生じたが，照射温度依存性は見られなかった。これは照射温度を変化させても酸化膜中の正孔の生成量は変わらず，また，熱によるアニールも起きていないことを示す。

Fig. 4.10に3.0×10^5R，室温で照射した2SK458の熱アニール温度に対するしきい値電圧の回復量を示す。熱アニール温度が100℃以下の時は2SK458のしきい値電圧はほとんど変化しない。これは照射によって酸化膜中にトラップされた正孔が100℃以下では熱アニールされないことを示す。このことから，2SK458では，照射後室温に長時間放置しても全く特性の回復が認められないことが分かる。Winokur[16]の試験したSiゲートインバータやＭＯＳキャパシタでは照射終了後，ただちに特性の回復がみられるものが多いが，パワーＭＯＳである2SK458ではこの点が異なる。Fig. 4.11に2SK458の酸化膜の漏れ電流（絶縁抵抗）の照射温度による変化の代表例を示す。酸化膜の漏れ電流は，温度を変化させて照射しても未照射時とほとんど変わらない。

(2) スイッチング時間

Fig.4.12及びFig.4.13に2SK458のスイッチング時間のあるオン時遅延時間$t_{d(on)}$，立ち上がり時間t_r，オン時遅延時間$t_{d(off)}$及び下降時間t_fの照射後の値を初期値で除した変化率を，照射温度に対して5ケの測定点をそのままプロットした。2SK458のスイッチング時間の各々についてデータのバラツキが±5％程度あることを考慮すると，照射温度及びバイアスによる測定値の変化はほとんど無い。

立ち上がり時間が平均15％減少していくこと及びオフ時遅延時間が照射により平均15％増加しているのは，照射によってしきい値電圧が1.5 V程度減少したためゲート電圧の増加に対するドレイン電流I_Dの変化が促進されたためであると考えられる。

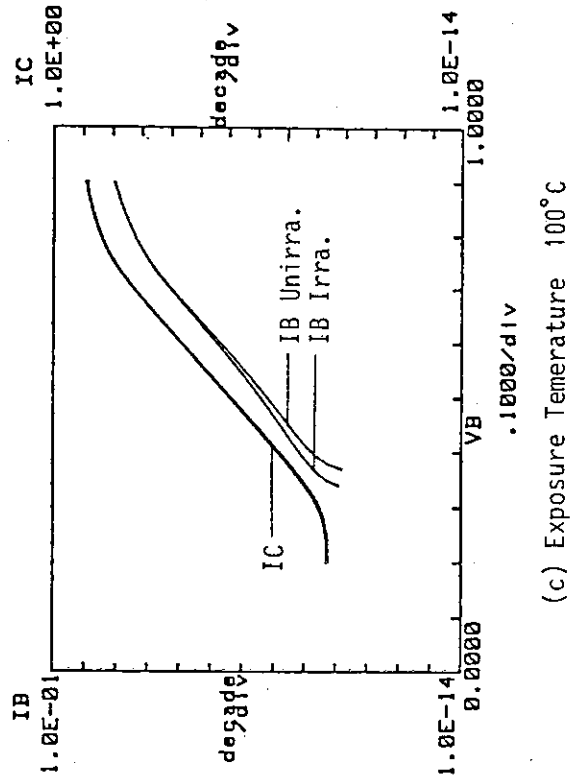


(a) Exposure Temperature 0°C

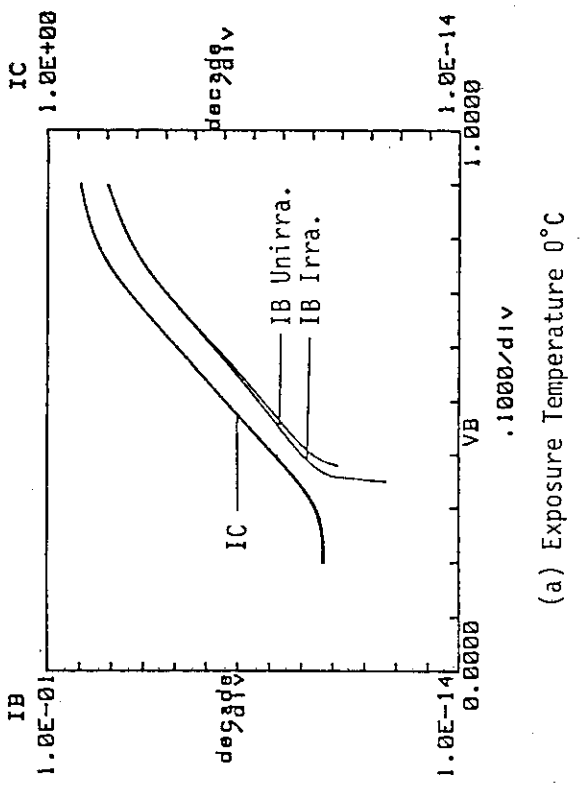
(b) Exposure Temperature 50°C

(c) Exposure Temperature 100°C

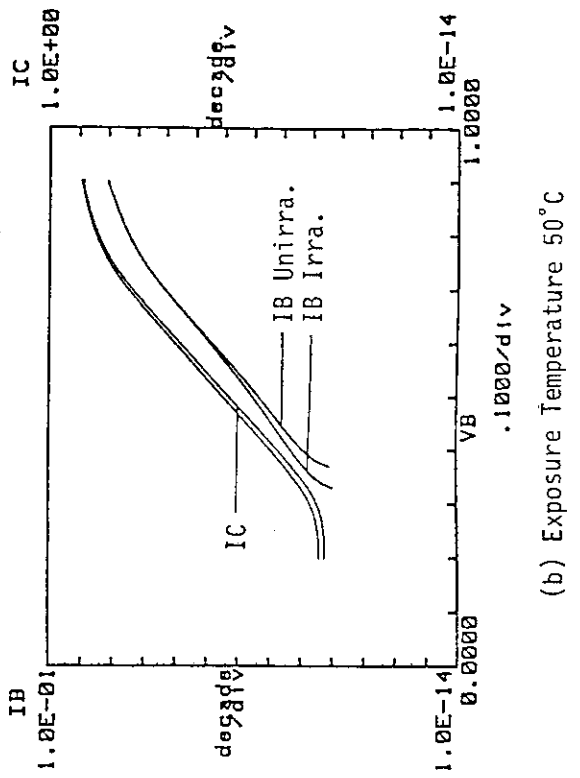
Fig. 4.1 Changes in I_B and I_C of 2SB603 at Various Exposure Temperatures.
Irradiation;1.1×10^3R/h, 5.0×10^4R: Bias Supplied



(c) Exposure Temerature 100°C



(a) Exposure Temperature 0°C



(b) Exposure Temperature 50°C

Fig. 4.2 Changes in I_B and I_{C_3} of 2SC764 at Various Exposure Temperatures. Irradiation;1.1×10^3R/h, 5.0×10^4R; Bias Supplied

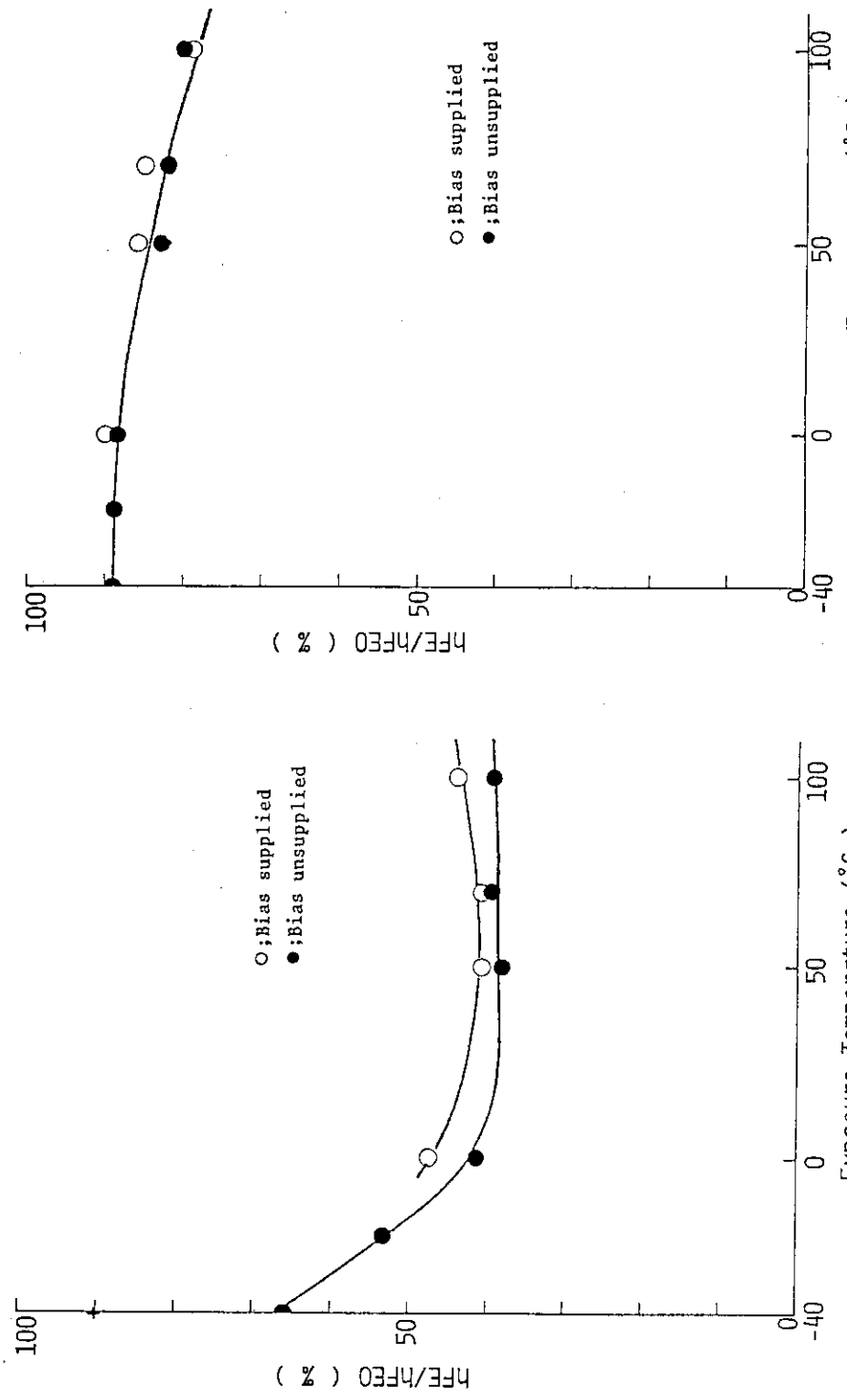
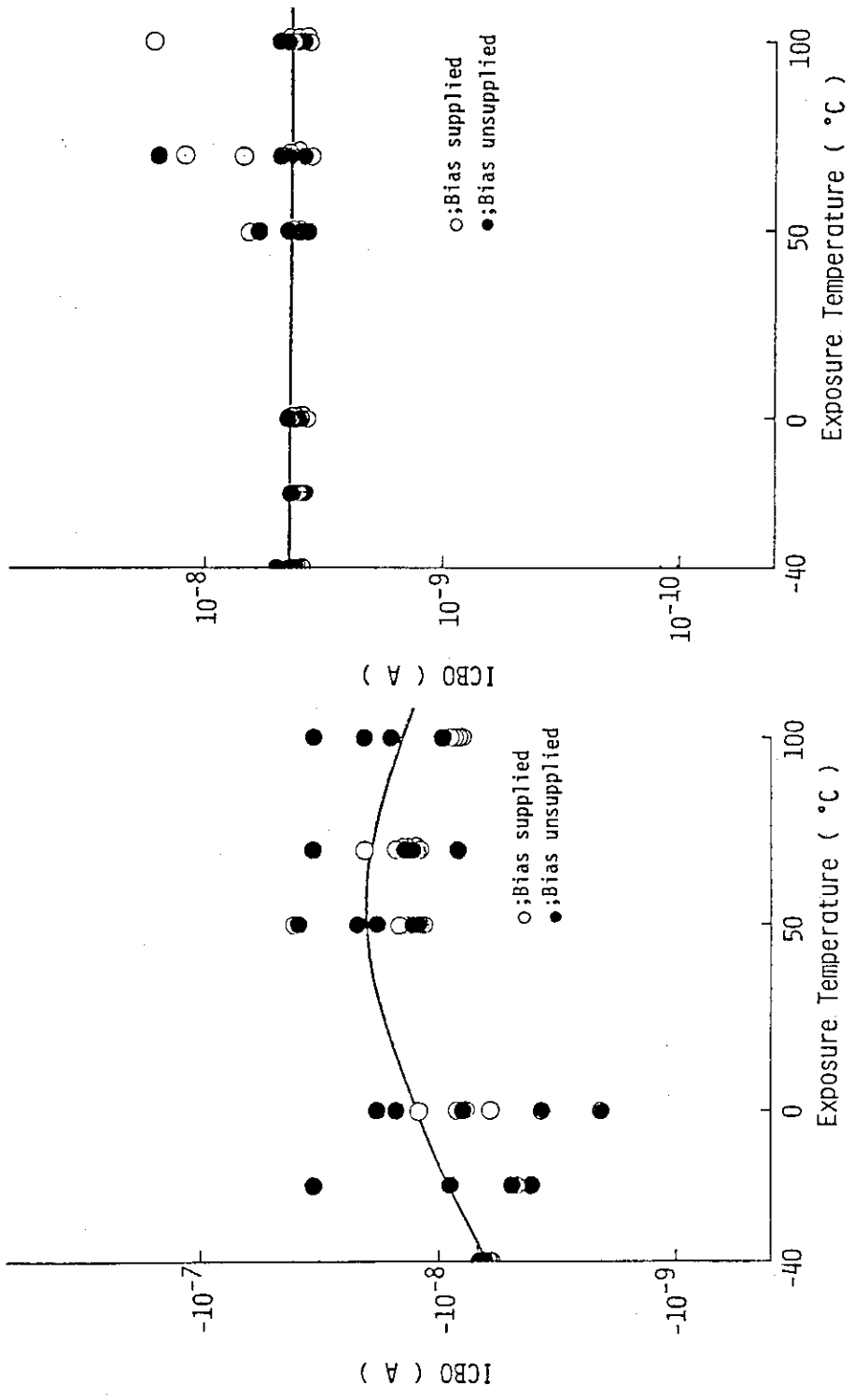


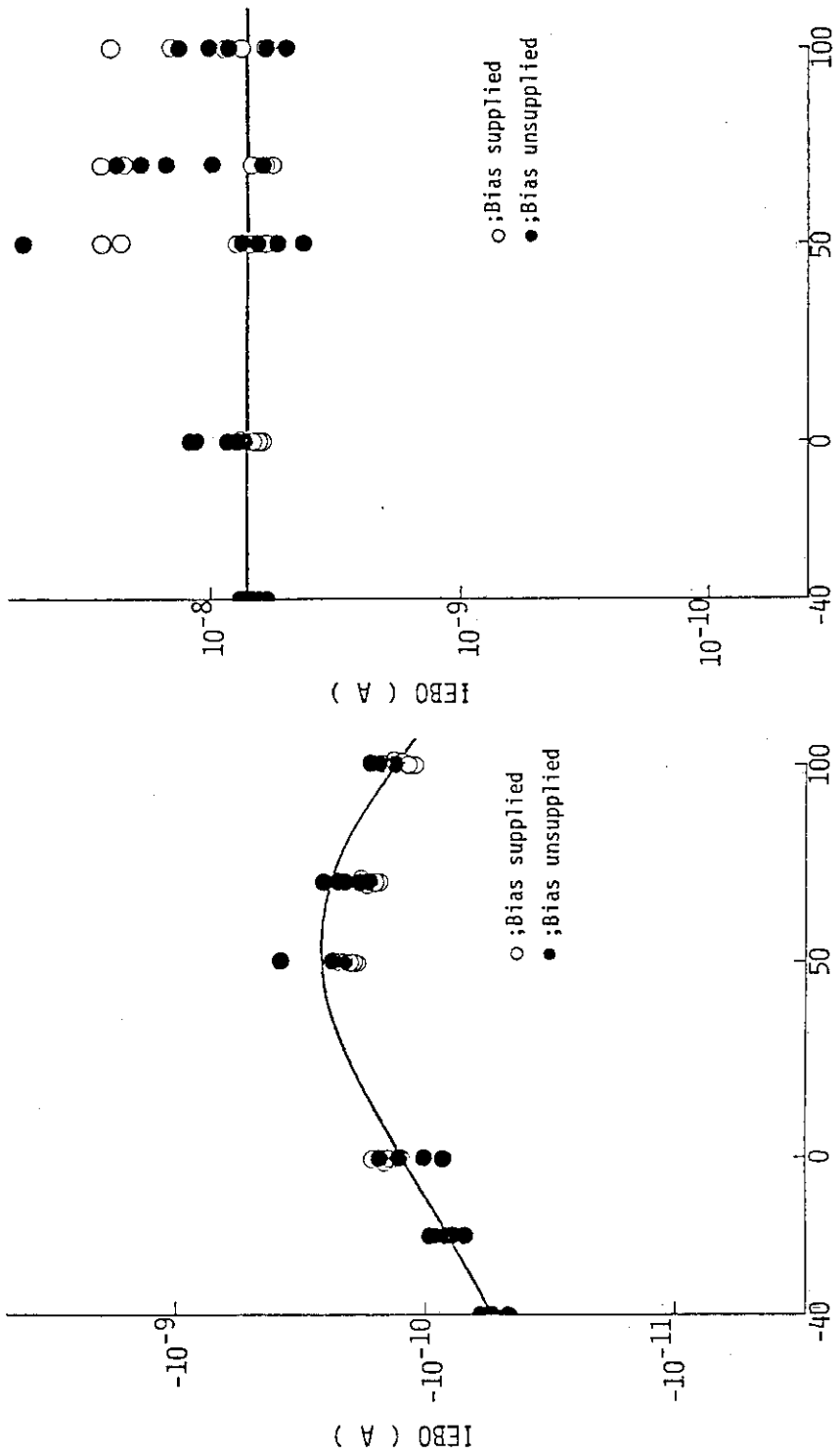
Fig. 4.3 Effect of Exposure Temperatures on h_{FE} of Bi-polar Transistors Irradiation.
Irradiation;1.1×10^{3}R/h, 5.0×10^{4}R
This condition is the same as form Fig.4.3 to Fig.4.9



(b) 2SC764 (V_{EB}=5V)

(a) 2SB603 (V_{EB}=5V)

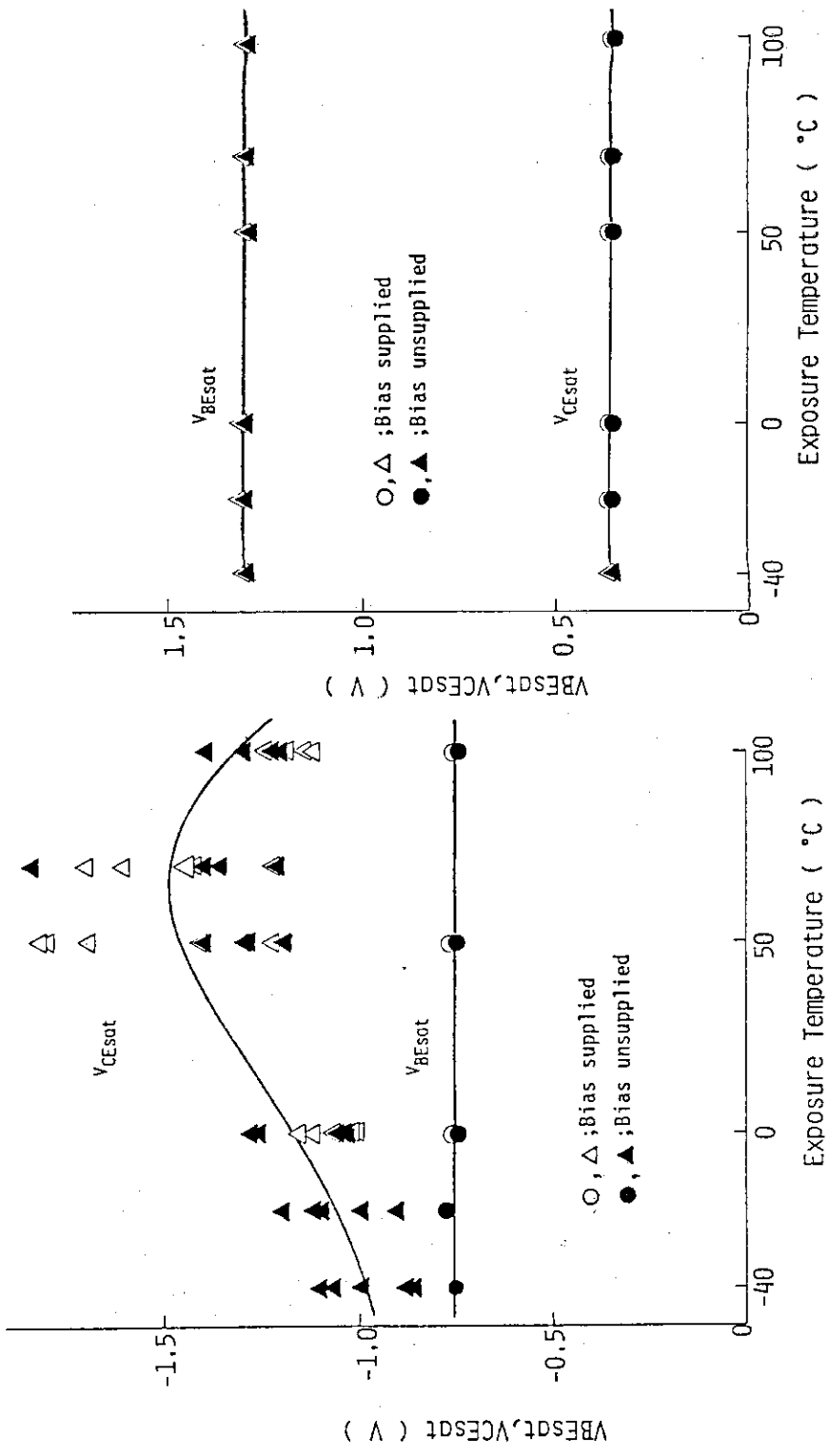
Fig. 4.4 Effect of Exposure Temperatures on I_{CBO} of Bi-polar Transistors.



(a) 2SB603 (V_{CB}=100V)

(b) 2SC764 (V_{CB}=-40V)

Fig. 4.5 Effect of Exposure Temperatures on I_{EBO} of Bi-polar Transistors.



(a) 2SB603 (IC=-0.1A)

(b) 2SC764 (IC=0.1A)

Fig. 4.6 Effect of Exposure Temperatures on $V_{BE(sat)}$ and $V_{CE(sat)}$ of Bi-polar Transistors.

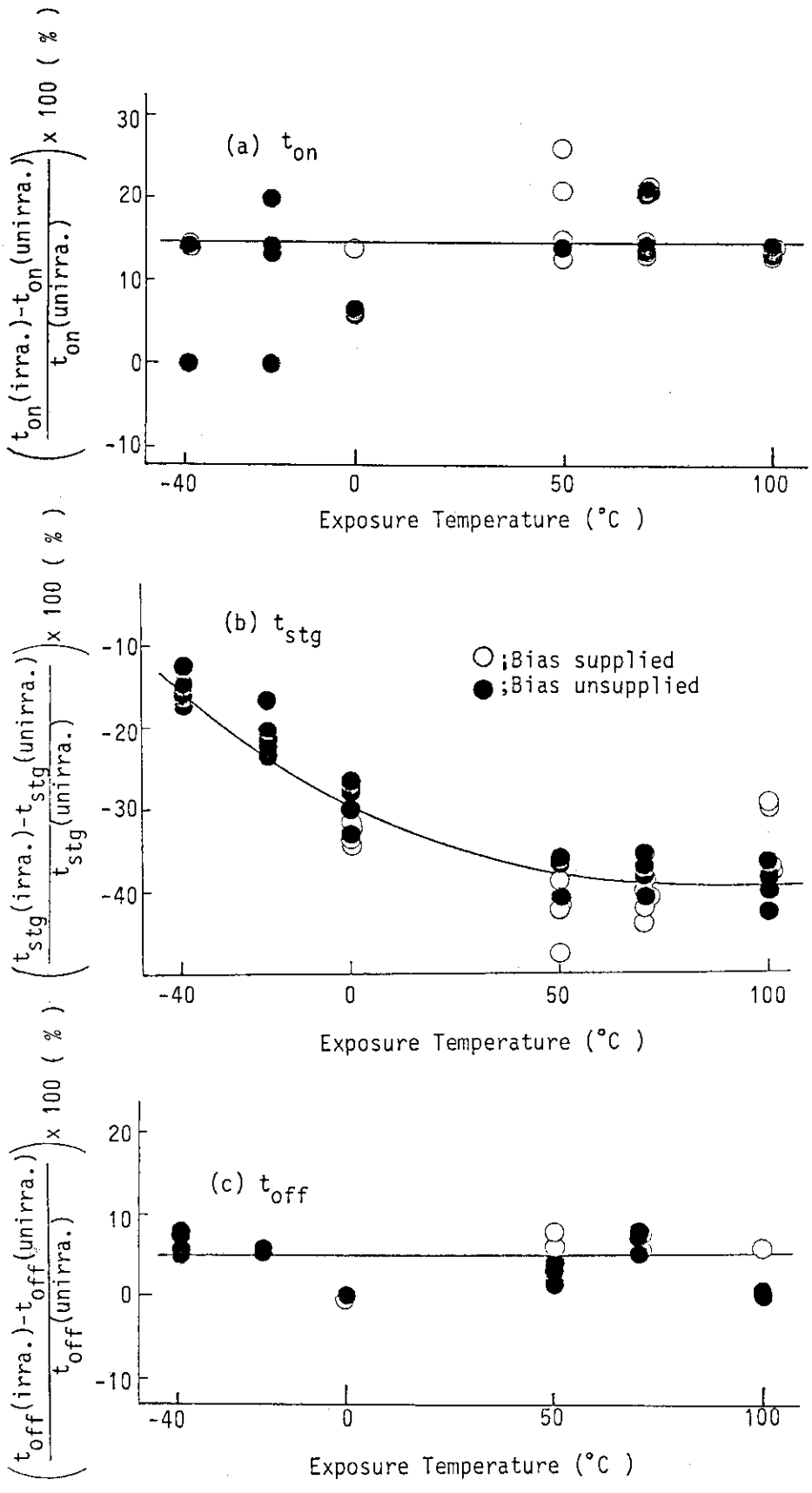


Fig. 4.7 Effect of Exposure Temperatures on Switching Time(t_{on},t_{stg},t_{off}) of 2SB603.

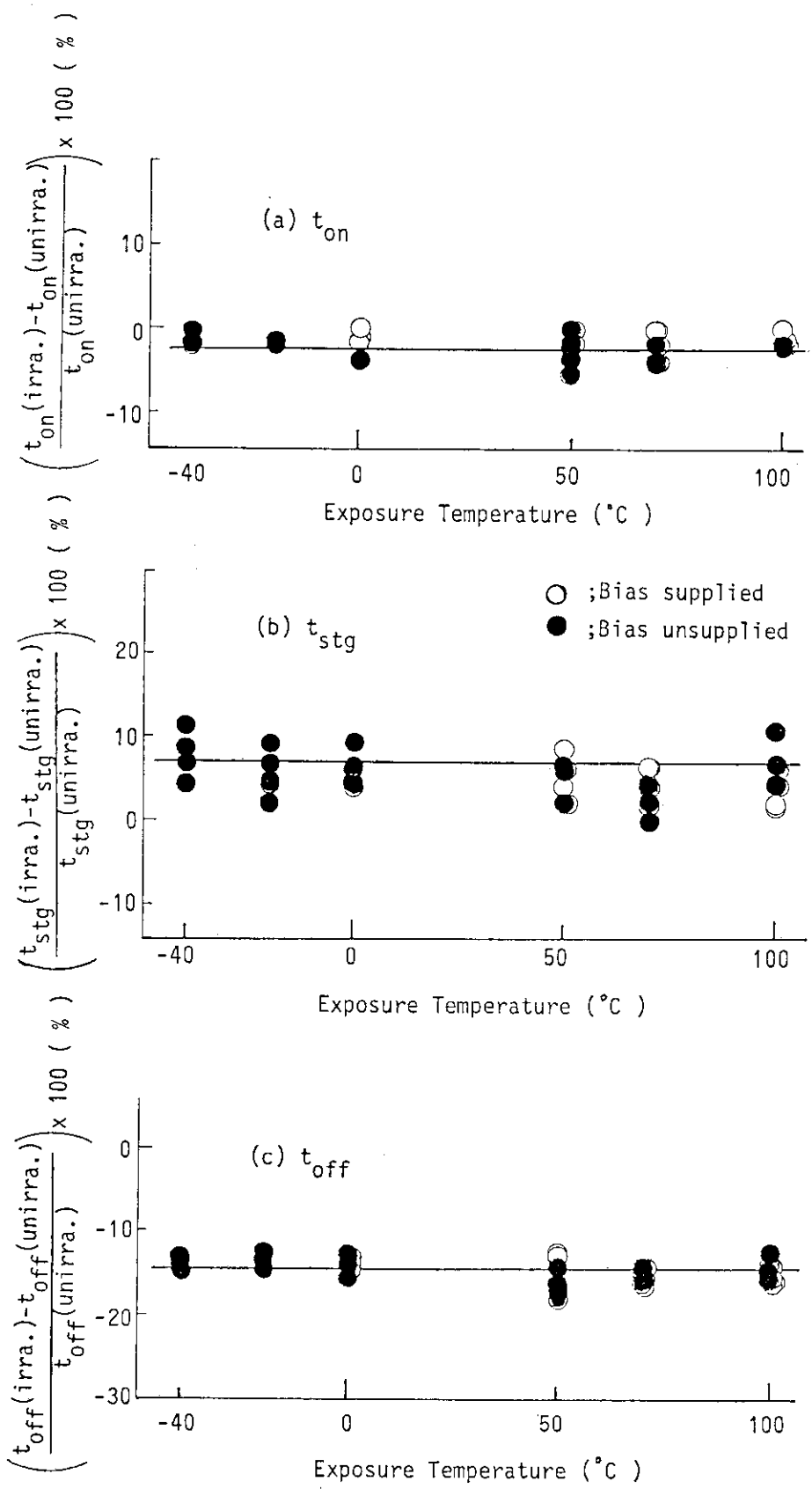
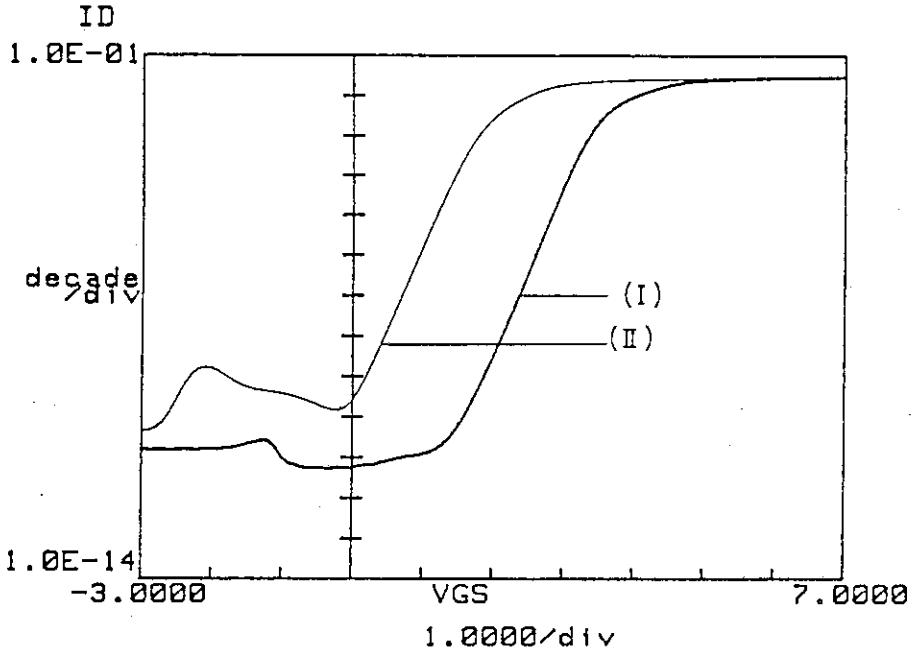
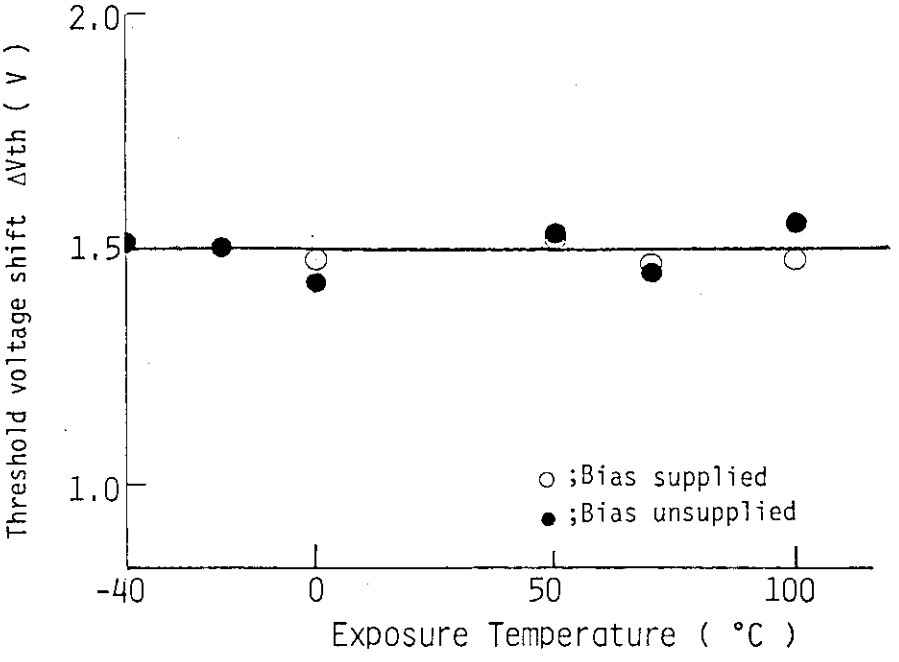


Fig. 4.8 Effect of Exposure Temperatures on Switching Time(t_{on},t_{stg},t_{off}) of 2SC764.



(a) Threshold Voltage Curves
(I) Unirradiation
(II) 100°C after $5x10^4$R($1.1x10^3$R/h) Irradiation



(b) Threshold Voltage Shift (ΔV_{th}) vs. Exposure Temperature

Fig. 4.9 Effect of Exposure Temperatures on ΔV_{th} of 2SK458.

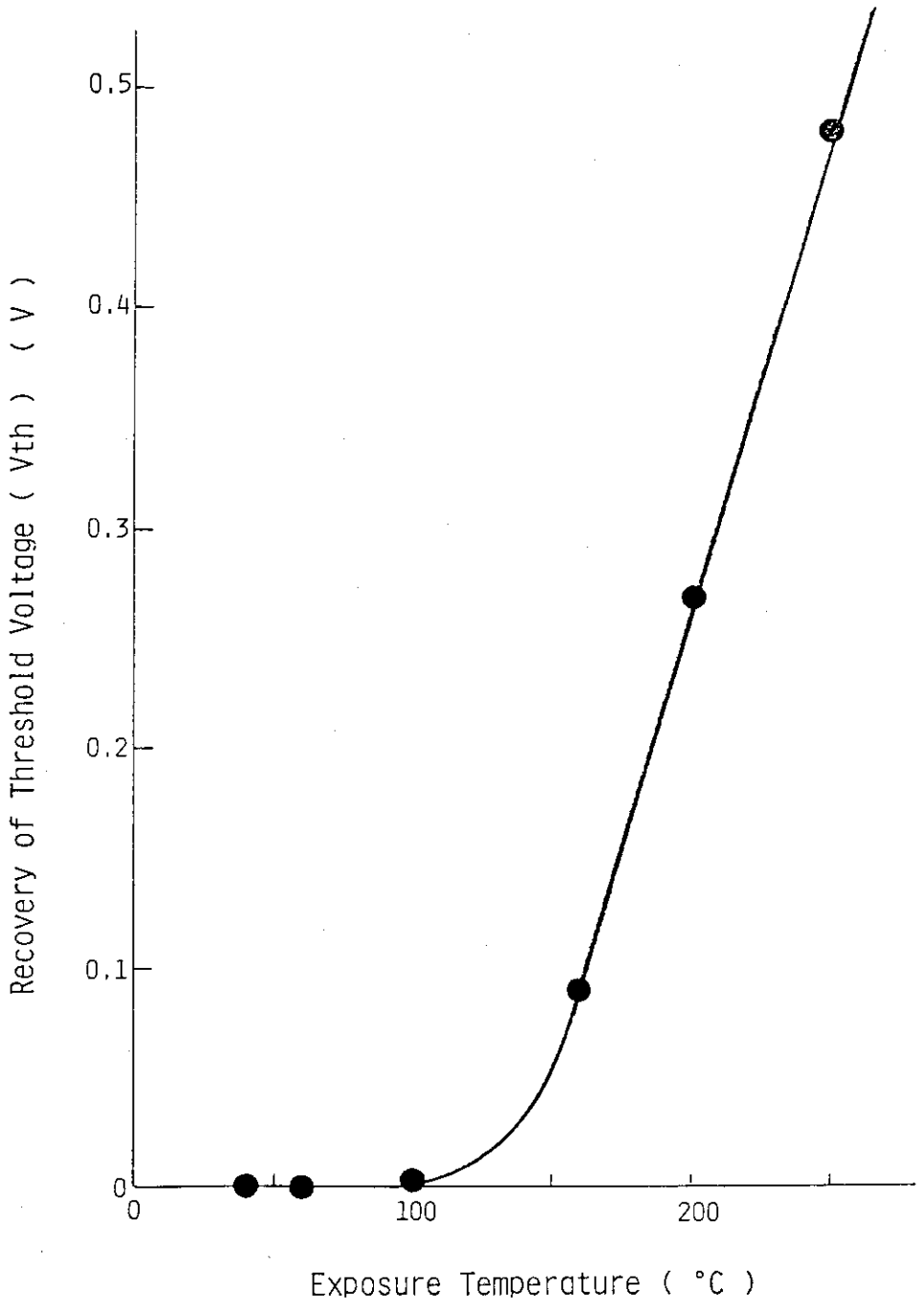
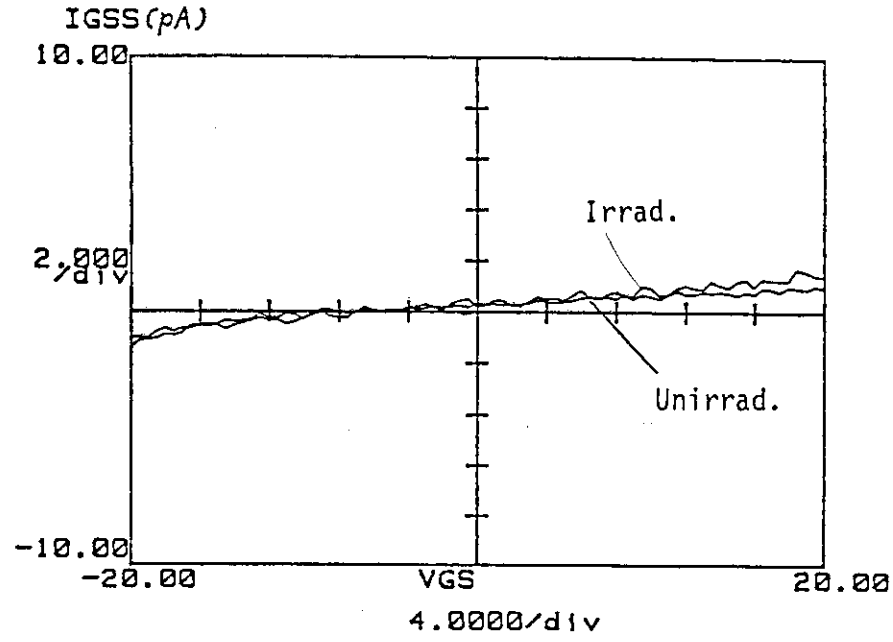


Fig. 4.10 Relationship between V_{th} Recovery of 2SK458 and Exposure Temperature.

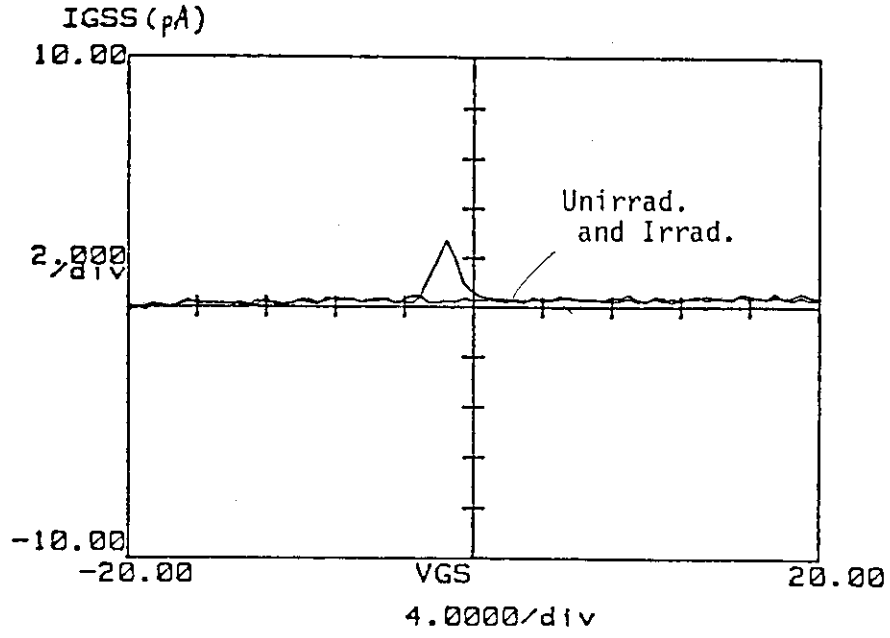
$V_{th}=V_{th}(H)-V_{th}(I)$

$V_{th}(H)$;V_{th} after heat treatment of 12∿16h.

$V_{th}(I)$;V_{th} immediately after irradiation.



(a) Exposure Temperature -40°C



(b) Exposure Temperature 100°C

Fig. 4.11 Leak Current(I_{GSS}) of Oxide Layer of 2SK458 on Various Exposure Temperatures. Irradiation;1.1×10^{3}R/h, 5.0×10^{4}R

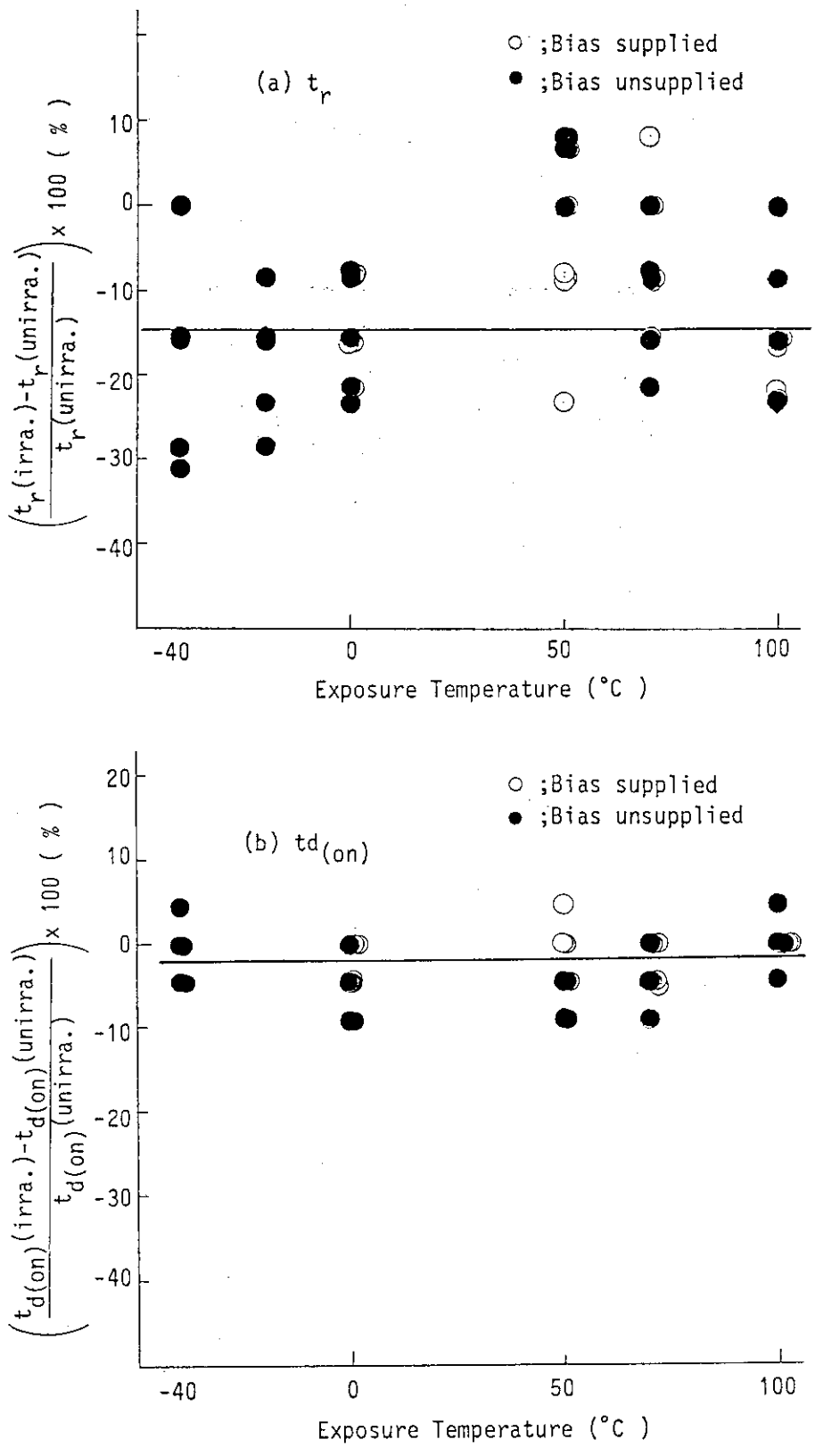


Fig. 4.12 Effect of Exposure Temperatures on Switching Time(t_r,$t_{d(on)}$) of 2SK458. Irradiation;1.1×10^3R/h, 5.0×10^4R

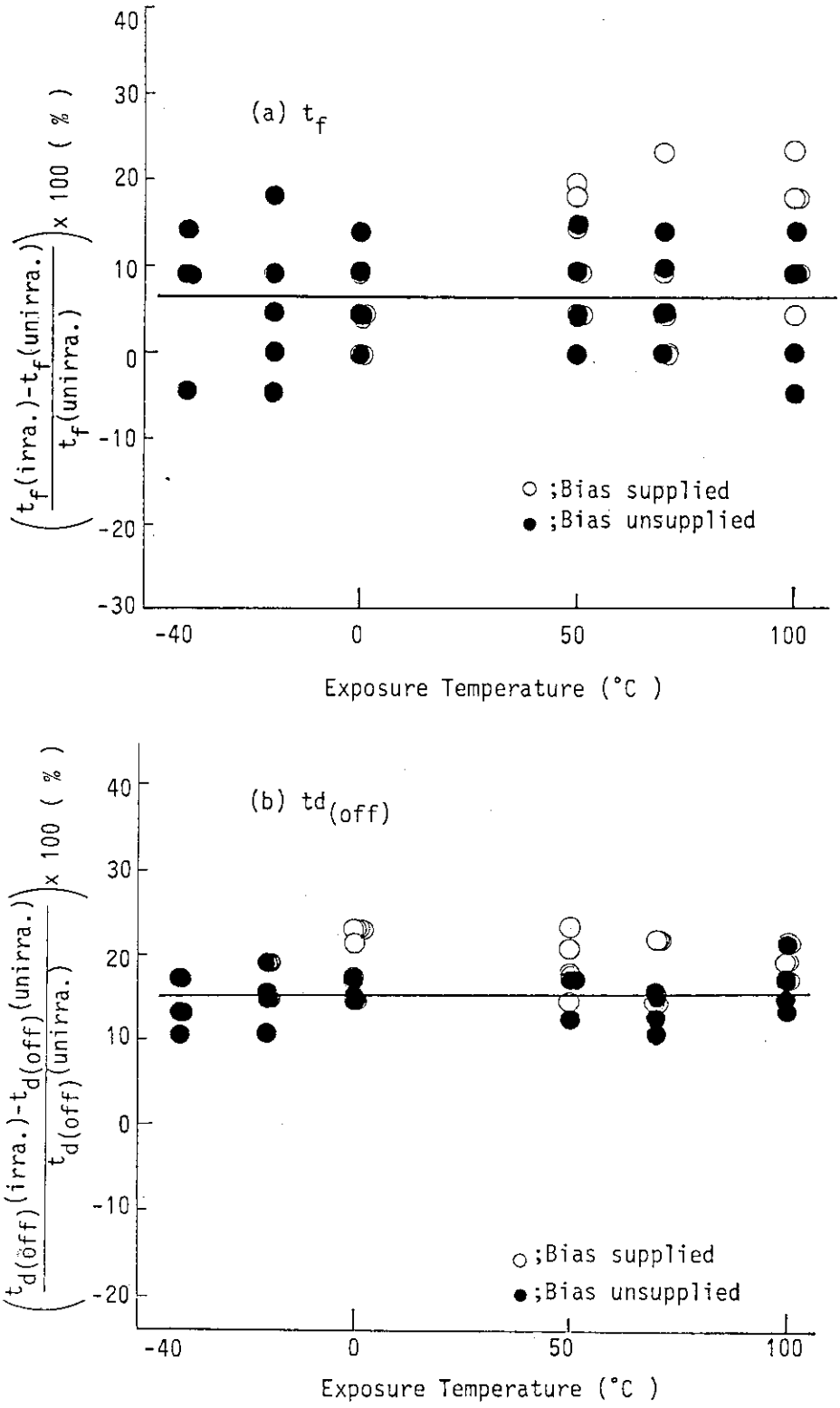


Fig. 4.13 Effect of Exposure Temperatures on Switching Time(t_f,$t_{d(on)}$) of 2SK458
Irradiation;1.1×10^3R/h, 5.0×10^4R

5. 結　　言

トランジスタの測定方法について，測定値の再現性を得るためには，①試料に急激な電圧・電流が加わらないような測定方法を選択する，②測定パラメータの変数のステップを小さくして十分な測定時間を持ち更に測定範囲を拡大して測定を行う，③試料の電気特性の安定を図るためには適当な熱処理が必要である，等が明らかとなった。

バイポーラトランジスタ2種類及びＭＯＳトランジスタを用いてγ線照射による線量率効果及び電子線照射との比較及び照射温度効果について検討を行った。

その結果，

(1)　２ＳＢ603トランジスタ（ＰＮＰトランジスタ）について

①　順方向電流及び直流増幅率については，低線量率照射の方が電気特性の変化が大きく，線量率依存性が認められた。また，照射後の回復現象も認められた。直流増幅率の変化は主にベース電流の変化によって生じる。

②　逆方向飽和電流及び飽和電圧に関しては，上記と同様線量率依存性を示した。

③　スイッチング時間に関しては，線量率による照射効果の違いは認められなかった。

④　照射中のバイアス効果については，高線量率照射と低線量率照射で相違が認められた。

⑤　照射温度の影響については，直流増幅率において認められた。また，照射温度が高くなるにつれ特性の回復がみられた。

(2)　２ＳＣ764トランジスタ（ＮＰＮトランジスタ）について

線量率による照射効果の違いは認められず，上述のバイポーラトランジスタ（２ＳＢ603）と比較した場合，照射線量で約2桁も耐放射線が優れていた。

また，照射温度による影響も認められなかった。

(3)　２ＳＫ458トランジスタ（ＭＯＳトランジスタ）について

電気特性は照射量の増加にともない変化するが，線量率の違いによる特性の変化は認められなかった。また，照射中のバイアス効果については，スイッチング時間の立ち上がり及び下降時間について明らかに照射中にバイアスを印加した方の変化が大きかった。これらトランジスタの照射効果について，検討した結果，バイポーラトランジスタ２ＳＢ603の増幅率，リーク電流などの特性変化はすでに知られているように，絶縁膜及び絶縁膜／半導体（Ｓｉ）界面の照射劣化によるものと考えられるが，絶縁膜／半導体界面準位の増加は正孔よりも移動度の遅い H^+ や O^+ が関与していると考えられる。

また，パワーＭＯＳトランジスタ２ＳＫ458では，絶縁膜中に正電荷が蓄積するが絶縁膜／Ｓｉ界面での界面準位がほとんど生成しないことから，絶縁膜が窒化膜，酸化膜などの二重構造になっていると推定された。

引　用　文　献

1) "STEADY STATE TOTAL DOSE IRRADIATION PROCEDURE", Military Specification, MIL-STD-883B method 1019.1 (4, Nov., 1980)

2) G. J. Brucker, "EXPOSURE-DOSE-RATE-DEPENDENCE FOR A CMOS/SOS MEMORY", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-28, No. 6, 4056(1981)

3) P. V. Dressendorfer, J. M. Soden, J. J. Harrington, T. V. Nordstrom, "THE EFFECTS OF TEST CONDITION ON MOS RADIATION-HARDNESS RESULTS", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-28, No. 6, 4281(1981)

4) P. S. Winokur and H. E. Boesch. Jr., "ANNEALING OF MOS CAPACITORS WITH IMPLICATIONS FOR TEST PROCEDURES TO DETERMINE RADIATION HARDNESS", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-28, No. 6, 4088(1981)

5) 後川：日本の科学と技術　25(1984)64

6) 金沢，春山，宇野，四本，鷲野，吉田，"高崎研1号加速器（デュアルビーム型，2MeV，60kw）の電子線出力特性"，JAERI－M 86－005(1986)

7) 田中，三友，須永，松田，田村，"CTA線量計マニュアル" JAERI－M 82－033(1982)

8) Kato, Nakamura, Toyabe, Okada, Nagata, "DEGRADATION ANALYSIS OF LATERAL PNP TRANSISTORS EXPOSED TO X-ray IRRADIATION", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-31, No. 6, 1513(1984)

9) "耐環境強化素子の研究開発成果の概要"，新機能素子研究開発協会発行　p83

10) P. S. Winokour, J. M. McGarrity and H. E. Boesch, Jr., "DEPENDENCE OF INTERFACE STATE BUILDUP ON HOLE GENERATION AND TRANSPORT IN IRRADIATED MOS CAPACITORS" IEEE Trans. Nucl. Sic., NS-23 1580(1976)

11) G. W. Hughes and G. J. Brucker, "Solid State Technol", No. 7, 70 (1979)

12) "耐環境強化素子の研究開発成果の概要"，新機能素子研究開発協会発行　p71

13) 同上

14) C. T. Sah., "ORIGIN OF INTERFACE STATES AND OXIDE CHARGES GENERATED BY IONIZINIG RADIATION", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-23, 1563(1976)

15) F. B. Mclean., "FRAME WORK FOR UNDERSTANDING RADIATION INDUCED INTERFACE STATE IN SiO2 MOS STRUCTURE", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-27, No. 6, 1651(1980)

16) P. S. Winokur, K. G. Kerris, L. Harper., "PREDICTING CMOS INVERTER RESPONSE IN NUCLEAR AND SPACE ENVIRONMENTS", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, No. 6, 4326(1983)

17) 後川，大西，“耐放射線性強化素子研究の現状”，応用物理，第55巻（3号），p 225，1986

18) 小島，田中，森田，瀬口，吉田，“ポリスチレンを用いて形成したアラニン線量計” JAERI−M，86−137

19) A. H. Johnston, 1980 IEEE Sponsored Short Cource, "RADIATION EFFECT ON COMPONENTS AND COMPONENT HARDENING", Cornell Unversity, lthaca, New York