

## P-N接合を有する半導体デバイス中の電子ビーム誘起過剰小数キャリアの定量的解析

その他（別言語等）のタイトル	Quantitative Analysis of the Electron Beam Excited Excess Minority Carriers in the Semiconductor Devices with the P-N Junctions
著者	栃木 誠, 橋本 幸男, 野村 滋, 原 進一
雑誌名	室蘭工業大学研究報告. 理工編
巻	10
号	5
ページ	783-790
発行年	1983-11-30
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/3754">http://hdl.handle.net/10258/3754</a>

# P-N 接合を有する半導体デバイス中の電子ビーム 誘起過剰少数キャリアの定量的解析

栃木 誠・橋本 幸男  
野村 滋・原 進一

## Quantitative Analysis of the Electron Beam Excited Excess Minority Carriers in the Semiconductor Devices with the P-N Junctions

Makoto Tochigi, Yukio Hashimoto, Shigeru Nomura  
and Shinichi Hara

### Abstract

Quantitative analysis of the electron beam induced current makes it possible to evaluate the minority carrier diffusion length in the device with a  $p-n$  junction three dimensionally and the surface recombination velocity with a high spacial resolution. The numbers of the excess carriers and the electron beam induced currents were calculated on the basis of the Green's function for the steady state point excitation in the semiconductor devices with the  $p-n$  junctions parallel or/and perpendicular to the surface.

### I. ま え が き

EBIC (Electron Beam Induced Currents) 法とは、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope) の鏡筒内部で加速した数 keV の電子ビームを半導体表面に照射し、そのデバイス内部で発生した多量の電子-正孔対を、拡散と電界により収集し、外部回路に電流 (EBIC) として測定する方法で、デバイスを破壊せずに表面下の構造や各種デバイスパラメータを解析することが可能である。

SEM を用いた試料の観察方法としては、入射電子ビームと固体表面の相互作用による2次電子あるいは反射電子を用いて、微細化半導体デバイスの表面構造と物性を、2次電子像あるいは反射電子像として通常観察されているが、デバイス表面下のデバイスパラメータの測定は直接的には不可能である。このため、EBIC 法を用いて、高エネルギー電子ビームにより発生する過剰キャリアの発生分布、少数キャリアのライフタイムと拡散定数、デバイス表面の再結

合速度等の解析が試みられている。

著者らは、表面・表面と水平な接合面・表面と垂直な接合面の3境界面を有するような構造のデバイス内部の発生過剰少数キャリアの拡散分布状態を、各種デバイスパラメータの関数として、解析的手法を用いて求めることを行なった。

## II. 本 論

点発生過剰少数キャリア濃度と EBIC の理論解析

### 1 章 表面に水平な PN 接合面を有するデバイス構造の場合

半導体デバイス内部の発生過剰少数キャリアの拡散と再結合過程を、微分方程式を用いて表現し、その方程式の解を求める。デバイスモデルの構造は、Fig. 1 に示すように、

- i) デバイス表面を、 $z=0$
- ii) P 層を、 $0 < z < z_l$ , N 層を、 $z_l + w < z$  の空間
- iii) PN 接合面の空間電荷層を、 $z_l < z < z_l + w$  の空間
- iv) P 層と N 層間に EBIC 用の電流計

と考える。過剰キャリアの発生分布と、過剰少数キャリアの拡散および再結合に関しては<sup>1) 2) 3)</sup>,

- v) 過剰キャリアは点発生
- vi) 空間電荷層内では、注入過剰キャリア濃度は零
- vii) デバイス内部での過剰キャリアの再結合速度は、その少数キャリア濃度に比例

と、仮定する。これより、位置座標  $\mathbf{r}$  における過剰少数キャリア濃度  $p(\mathbf{r})$  の状態方程式を考察すると

$$\Delta p(\mathbf{r}) - \frac{1}{L^2} p(\mathbf{r}) = -\frac{1}{D} \cdot \rho \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) : L = \sqrt{D \cdot T} \quad (2.1.1)$$

$$p(\mathbf{r}) \Big|_{z=z_l} = 0 \quad (2.1.2)$$

$$D \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial z} \Big|_{z=0} = v_s \cdot p(\mathbf{r}) \Big|_{z=0} \quad (2.1.3)$$

$\mathbf{r}$  位置ベクトル ( $x, y, z$ )

$\mathbf{r}_0$  点発生過剰キャリア源の位置ベクトル ( $x_0, y_0, z_0$ )

$p(\mathbf{r})$  位置  $\mathbf{r}$  の過剰少数キャリア濃度

$\delta(\mathbf{r})$  クレッチマのデルタ：単位体積当りの過剰キャリアの単位発生量

$\Delta$  ラプラシアン ( $= \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ )

$D$  拡散定数

$T$  過剰少数キャリアのライフタイム

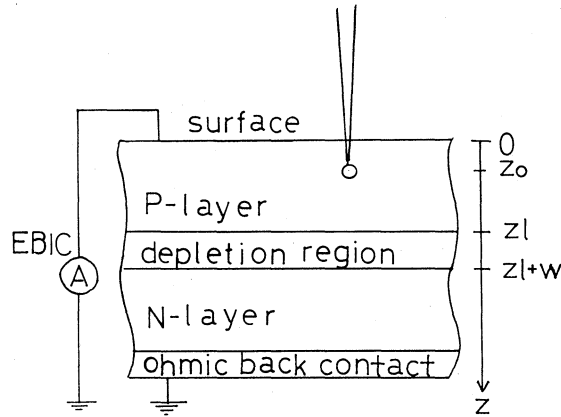


Fig. 1 Device model

- $\rho$  キャリア発生速度
- $v_s$  表面再結合速度
- $L$  拡散長

と、表わされる。この座標系を拡散長  $L$  を単位長として無次元化すると、

$$\begin{aligned}
 X &= x/L; \quad Y = y/L; \quad Z = z/L; \quad ZL = z/L \\
 P(\mathbf{R}) &= p(\mathbf{r}) \times L^3; \quad \mathbf{R}(X, Y, Z); \quad \mathbf{R}_0(X_0, Y_0, Z_0) \\
 V_s &= v_s \cdot L/D \tag{2.1.4}
 \end{aligned}$$

$\delta$ : 単位体積  $L^3$  当りの過剰キャリアの単位発生量

$$\Delta = \partial^2/\partial X^2 + \partial^2/\partial Y^2 + \partial^2/\partial Z^2 = L^2 \Delta$$

$$\text{次に、グリーン関数 } Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) = P(\mathbf{R})/(\rho \cdot T) \tag{2.1.5}$$

を、導入して

$$\Delta Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) - Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) = \delta(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0) \tag{2.1.6}$$

$$Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \Big|_{Z=ZL} = 0 \tag{2.1.7}$$

$$\frac{\partial}{\partial Z} Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \Big|_{Z=0} = V_s \cdot Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \Big|_{Z=0} \tag{2.1.8}$$

この連立方程式は、第1種零次ベッセル関数展開を用いた円筒座標変換と、グリーン関数の性質を用いて、解析的に解くことが可能である。これより、このグリーン関数は、

$$\begin{aligned}
 Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) &= \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda}{A(\lambda)} \cdot J_0(\lambda \cdot \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}) \\
 &\quad \times [\exp\{-A(\lambda) \cdot |Z - Z_0|\} \\
 &\quad + f_1(\lambda) \cdot \exp\{-A(\lambda) \cdot (Z + Z_0)\}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + f_2(\lambda) \cdot \exp\{A(\lambda) \cdot (Z + Z_0)\} \\
& + f_3(\lambda) \cdot \{\exp\{A(\lambda) \cdot (Z - Z_0)\} + \exp\{A(\lambda) \cdot (Z_0 - Z)\}\} \cdot d\lambda
\end{aligned} \tag{2.1.9}$$

$$A(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 + 1} \tag{2.1.10}$$

$$f_1(\lambda) = (A(\lambda) - V_s) / f_4(\lambda) \tag{2.1.11}$$

$$f_2(\lambda) = -(A(\lambda) + V_s) \cdot \exp(-2A(\lambda) \cdot ZL) / f_4(\lambda) \tag{2.1.12}$$

$$f_3(\lambda) = -(A(\lambda) - V_s) \cdot \exp(-2A(\lambda) \cdot ZL) / f_4(\lambda) \tag{2.1.13}$$

$$f_4(\lambda) = (A(\lambda) + V_s) + (A(\lambda) - V_s) \cdot \exp(-2A(\lambda) \cdot ZL) \tag{2.1.14}$$

と、求められる。ただし、 $J_0(x)$  は第1種零次ベッセル関数である。この解法を次に示す。

#### A グリーン関数 $Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0)$ の解法

ここでは、次の条件を満たすグリーン関数  $Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0)$  を求める解法を示す。

条件としては、(2.1.6)・(2.1.7)・(2.1.8) の3式を満たすこととする。

(2.1.6) 式のみを満たすある特解として、

$$Gr_1(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) = \frac{\exp(-|\mathbf{R} - \mathbf{R}_0|)}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}_0|} \tag{A. 1}$$

が、得られている。この解を、第1種零次ベッセル関数展開を用いて円筒座標系に変換すると、

$$\begin{aligned}
Gr_1(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) &= \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda}{A(\lambda)} J_0(\lambda \cdot \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}) \\
&\quad \times \exp\{-A(\lambda) \cdot |Z - Z_0|\} \cdot d\lambda
\end{aligned} \tag{A. 2}$$

$$A(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 + 1} \tag{A. 3}$$

と、表わされる。次に、(2.1.6) 式の余関数  $Gr_2(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0)$  を、

$$\Delta Gr_2(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) - Gr_2(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) = 0 \tag{A. 4}$$

より求める。(A. 2) 式より、グリーン関数の性質を用いて、

$$Gr_{2a}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty H(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0, \lambda) \cdot \exp\{-A(\lambda) \cdot (Z + Z_0)\} \cdot d\lambda \tag{A. 5}$$

$$Gr_{2b}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty H(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0, \lambda) \cdot \exp\{A(\lambda) \cdot (Z + Z_0)\} \cdot d\lambda \tag{A. 6}$$

$$\begin{aligned}
Gr_{2c}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) &= \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty H(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0, \lambda) \cdot [\exp\{A(\lambda) \cdot (Z - Z_0)\} \\
&\quad + \exp\{A(\lambda) \cdot (Z_0 - Z)\}] \cdot d\lambda
\end{aligned} \tag{A. 7}$$

ただし,

$$H(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0, \lambda) = \frac{\lambda}{A(\lambda)} \cdot \mathbf{J}_0(\lambda \cdot \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}) \quad (\text{A. 8})$$

と, 3種類の余関数が求められた,  $Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0)$  を,  $Gr_1, Gr_{2a}, Gr_{2b}, Gr_{2c}$  より, ラグランジュの未定乗数法を用いて求める。未定乗数としては,  $f_1(\lambda), f_2(\lambda), f_3(\lambda)$  を用いて,  $\mathbf{R}_0$  に関しては独立な定数とする。これより,

$$\begin{aligned} Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) &= Gr_1(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) + f_1(\lambda) \cdot Gr_{2a}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \\ &\quad + f_2(\lambda) \cdot Gr_{2b}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \\ &\quad + f_3(\lambda) \cdot Gr_{2c}(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \end{aligned} \quad (\text{A. 9})$$

と, 仮定する。(2.1.7) 式の境界条件より,  $Z_0$  に関する恒等式と考えると,

$$\begin{cases} \exp(-ZL) + f_2(\lambda) \cdot \exp(ZL) + f_3(\lambda) \cdot \exp(-ZL) = 0 & (\text{A. 10}) \\ f_1(\lambda) \cdot \exp(-ZL) + f_3(\lambda) \cdot \exp(ZL) = 0 & (\text{A. 11}) \end{cases}$$

(2.1.8) 式の境界条件より,  $Z_0$  に関する恒等式と考えると,

$$\begin{cases} A(\lambda) \cdot \{1 - f_1(\lambda) + f_3(\lambda)\} = V_s \cdot \{1 + f_1(\lambda) + f_3(\lambda)\} & (\text{A. 12}) \\ A(\lambda) \cdot \{f_2(\lambda) - f_3(\lambda)\} = V_s \cdot \{f_2(\lambda) + f_3(\lambda)\} & (\text{A. 13}) \end{cases}$$

以上4式より,  $f_1(\lambda), f_2(\lambda), f_3(\lambda)$  を求めることが可能で,  $Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0)$  は求められる。

以上  $Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0)$  の解法おわり

(2.1.5) 式より, 発生過剰少数キャリア濃度  $P(\mathbf{R})$  は,

$$P(\mathbf{R}) = \rho \cdot T \cdot Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) \quad (\text{2.1.15})$$

と, 表わされる。このときの EBIC は, 発生過剰少数キャリアの無限 PN 接合面への流出量であるから,

$$I_{EBIC} = -e \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial Z} P(\mathbf{R}) \Big|_{Z=ZL} \cdot dX \cdot dY \quad (\text{2.1.16})$$

と, 表わされる。ただし,  $e$  は電子の電荷量である。

2章 表面に水平な PN 接合面と, 表面に垂直な PN 接合面を有するデバイス構造の場合  
デバイスモデルの構造は, Fig. 2 に示すように,

- i) デバイス表面を,  $z=0$
- ii) 表面に水平な PN 接合面を,  $x=0$  ( $0 \leq z \leq zl$ )
- iii) 表面に垂直な PN 接合面を,  $z=zl$  ( $0 \leq x < \infty$ )

とし, その他は1章と同様に考える。

これより, 位置座標  $\mathbf{r}$  における過剰少数キャリア濃度  $p(\mathbf{r})$  の, 状態方程式を考察すると,

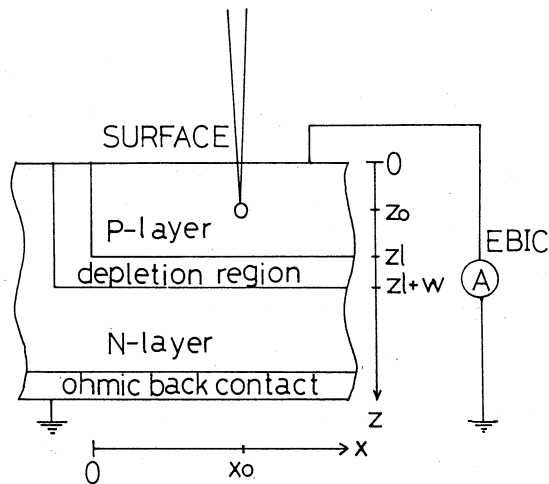


Fig. 2 Device model

1章と同様に考えて、

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta p(\mathbf{r}) - \frac{1}{L^2} p(\mathbf{r}) &= -\frac{1}{D} \rho \cdot \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \end{aligned} \right. \quad (2.2.1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} p(\mathbf{r}) \Big|_{\substack{0 \leq x \\ z=z_1}} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (2.2.2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} p(\mathbf{r}) \Big|_{\substack{0 < z < z_1 \\ x=0}} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (2.2.3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} D \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial z} \Big|_{\substack{0 \leq x \\ z=0}} &= v_s \cdot p(\mathbf{r}) \Big|_{\substack{0 \leq x \\ z=0}} \end{aligned} \right. \quad (2.2.4)$$

と、表わされる。

これらの座標系を(2.1.4)と同様に拡散長  $L$  で無次元化して、 $P$  層内の発生過剰少数キャリア濃度  $P(\mathbf{R})$  を求める。ただし、 $P(\mathbf{R})$  は拡散長  $L$  を単位長とした濃度であり、 $P(\mathbf{R}) = L^3 \cdot p(\mathbf{r})$  である。

これらの連立方程式を満たす解は、 $Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0)$  に鏡像法を用いて、過剰キャリアの点発生源と表面に垂直な  $PN$  接合面に関して対称な鏡像点に、仮定の過剰キャリアの点吸入源を配置することにより、

$$P(\mathbf{R}) = \rho \cdot T \{ Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_0) - Gr(\mathbf{R}, \mathbf{R}_1) \} \quad (2.2.5)$$

と、求められる。ただし、 $\mathbf{R}_1$  は平面  $X=0$  に関する発生点  $\mathbf{R}_0$  の対称点である。この解は、2接合面での境界条件  $P(\mathbf{R})=0$  が満たされている。

このときの EBIC は、

$$I_{EBIC} = e \left[ - \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial Z} P(\mathbf{R}) \Big|_{z=z_1} \cdot dX \cdot dY + \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{z_1} \frac{\partial}{\partial X} P(\mathbf{R}) \Big|_{x=0} \cdot dZ \cdot dY \right] \quad (2.2.6)$$

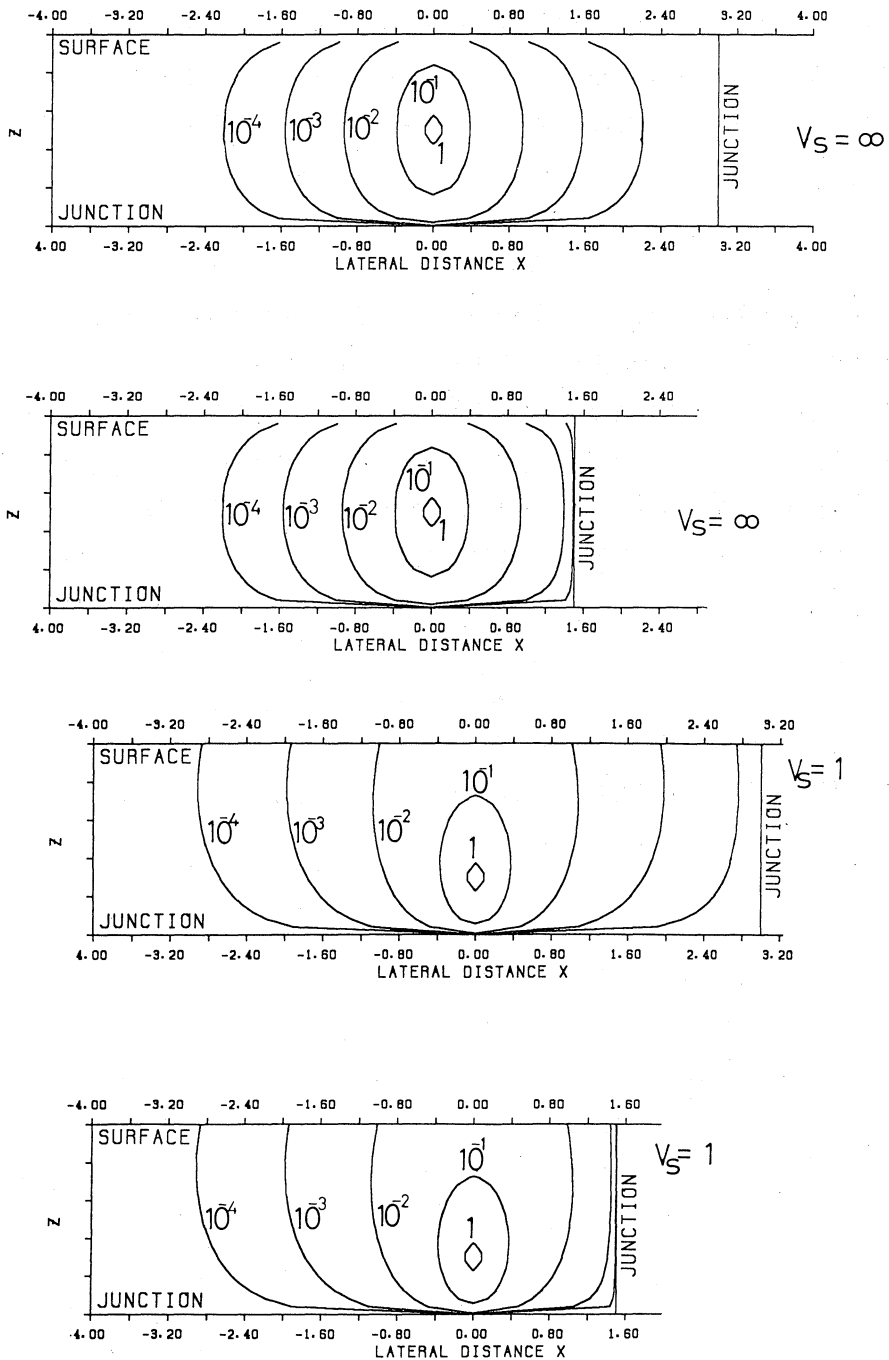


Fig. 3 Density of excess carriers

と、表わされる。

(2.2.5) 式より、デバイスモデル内部の点発生過剰キャリア濃度分布を数値計算した結果を Fig. 3 に示す。 $ZL=1$ ,  $\rho \cdot T=1$ , 座標単位は拡散長  $L$  として、等濃度曲線によりグラフ化



した。このグラフより、デバイス内部の過剰少数キャリアの拡散状態を、表面再結合速度・過剰キャリア発生点の位置関係等をパラメータとして観察することが可能となり、境界面付近でのキャリアの流出方向が、各種の物理的境界条件を満たしていることがわかる。

### III. ま と め

半導体デバイス構造の近似デバイスモデルにおいて、表面と  $PN$  接合面の境界条件を考慮した、点発生過剰少数キャリアの拡散状態の解析法と EBIC 応答の理論式を求めた。

EBIC の実験データとこの理論解析値の比較には、電子ビームによる過剰キャリア発生分布の3次元解析が必要であり、今後はこの発生分布を考察した EBIC 応答の解析が課題と思われる。尚、本研究の一部は昭和55年度、56年度、文部省科学研究費、特定研究(1)「トレース・キャラクターゼーション」による。ここに記して謝す。

(昭和58年5月20日 受理)

### 文 献

- 1) W. van Roosbroeck, Phys. Rev. 91, 282 (1953).
- 2) W. van Roosbroeck, J. Appl. Phys. 26, 380 (1955).
- 3) F. Berz and et al., Solid-State Electronics, 1976, Vol. 19, pp. 437-445.