

超電導トランジスタ

Superconducting Transistors

超電導材料のエレクトロニクス応用を進めるために、集積回路の構成が容易なトランジスタ形超電導デバイスの開発が望まれている。このため、超電導体と半導体を組み合わせた電界効果形超電導トランジスタの動作原理とデバイス特性について実験的に検討した。その結果、超電導電流を電圧で制御できる電界効果形超電導トランジスタを実現できた。その動作原理は超電導波動関数の制御であり、従来のデバイスとはまったく異なる。動作原理実験に続いて、集積化に適したプレーナ形超電導トランジスタの開発を進めた。半導体にSi、超電導体にNbを用い、ゲート長が約 $0.1\ \mu\text{m}$ の試験素子を作製し、その動作を液体ヘリウム温度(4.2 K)で確かめた。この超電導トランジスタは、消費電力と動作速度で従来のジョセフソン素子と同程度の性能を持つことに加え、集積回路の構成が容易になることが期待できる。

西野壽一* *Toshikazu Nishino*
矢木邦博** *Kunihiro Yagi*
川辺 潮* *Ushio Kawabe*

1 緒 言

超電導材料のエレクトロニクス分野への応用は、超高速のコンピュータや新しい医療診断装置の実現など、夢と期待が大きい分野である。本稿に述べる超電導トランジスタは、超電導材料の新しい超電導デバイスへの応用を目的として研究を進めている。

超高速の超電導デバイスとしてよく知られているものに、ジョセフソン素子がある。ジョセフソン効果が二つの超電導体間に生じることからわかるように、この素子は二端子のダイオード的デバイスである。このため、超電導デバイスを使ったコンピュータを開発するために、半導体トランジスタと類似の三つの端子を持った超電導デバイスの実現が望まれていた。これが超電導トランジスタ研究の動機である。超電導トランジスタと呼ばれるデバイスにはいくつかのタイプがあり、三つの端子を持ち、その一部分に超電導体を使ったデバイスのことをまとめてこのように呼んでいる^{1),2)}。このうち電界効果形超電導トランジスタは、超電導体と半導体を組み合わせて使用し、超電導電流を制御できる代表的な三端子形の超電導デバイスである。その提案は1980年に英国サセックス大学のClarkによって行われたが³⁾、実現は1984年に発表した日立製作所の原理動作実験が世界初であった⁴⁾。電界効果形超電導トランジスタの特徴は、超高速で低消費電力のトランジスタ形デバイスであり、ほかのタイプに比べて信号の入出力分離がよく、さらに、デバイスの動作が超電導波動関数の制

御という従来の半導体デバイスとは異なった新しい原理に基づいている点にある。現在では、国内外の研究機関から二、三の電界効果形超電導トランジスタに関する研究結果が報告されている^{5),6)}。

ここでは、これまで日立製作所で研究を進めてきた電界効果形の超電導トランジスタについて、その動作原理およびデバイス特性の研究結果を報告し、さらに集積化に適したプレーナ構造の超電導トランジスタの開発について述べる。

2 超電導トランジスタ

電界効果形の超電導トランジスタは、超電導性そのものを制御して動作する点で、ほかの超電導デバイスに比べて際だった特徴がある。したがって、電界効果形の超電導トランジスタは実用面で新しい技術であるばかりでなく、その物理現象にも興味深いものがある⁷⁾。初めに、電界効果形超電導トランジスタの構造と動作原理について、その物理現象にも触れながら説明する。

代表的な構造図を図1に示す⁸⁾。超電導トランジスタは超電導体でできたソースとドレーンの二つの超電導電極を、半導体単結晶の表面に形成し、両超電導電極の間に薄い酸化膜で絶縁された制御用の第三の電極(ゲート電極)を設けた構造を持つ。この構造はいわゆるプレーナ形であって、超電導のソース、ドレーン電極およびゲート電極が半導体表面に設けら

* 日立製作所中央研究所 理学博士 ** 日立製作所中央研究所 工学博士

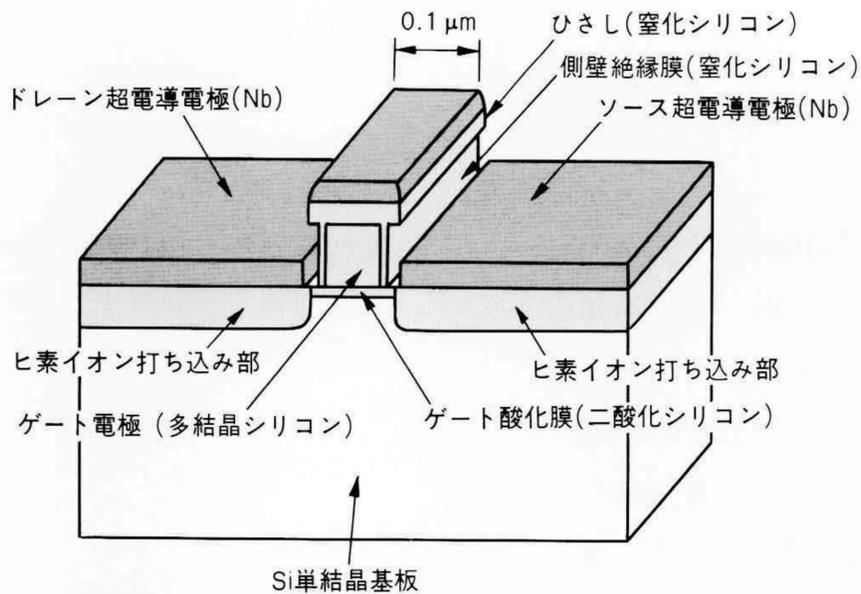


図1 超電導トランジスタの断面構造図 超電導のソースとドレーン電極およびゲート電極が、半導体表面に設けられたプレーナ形である。

れている。

この超電導トランジスタでは、ソースとドレーン電極の間に半導体を介して、ジョセフソン効果によって流れる超電導電流の大きさを、ゲート電極に印加した電圧によって制御できる。本来は超電導現象を示さない半導体の中を超電導電流が流れるのは、超電導近接効果によって超電導電子対が半導体中に染み出し、半導体が超電導性を帯びるためである⁷⁾。超電導トランジスタは、この超電導近接効果を電界効果によって制御し動作している。

超電導体と半導体の境界での超電導性の指標(超電導ペアポテンシャル)の場所による変化を、模式的に図2に示す。一般に、超電導体と常電導体が接した系で、超電導体中から常電導体(あるいは半導体)中へ距離 x だけ離れた位置で、超電導性を担う電子対の存在確率はDeutcherとde Gennesによれば図2に示すように変化し、距離 x とともに指数関数的に減衰する⁹⁾。この際の減衰の特性長(確率が $\frac{1}{e}$ に減衰するまでの長さ) ξ は、超電導コヒーレンス長さと呼ばれ、SetoとVan Duzerに

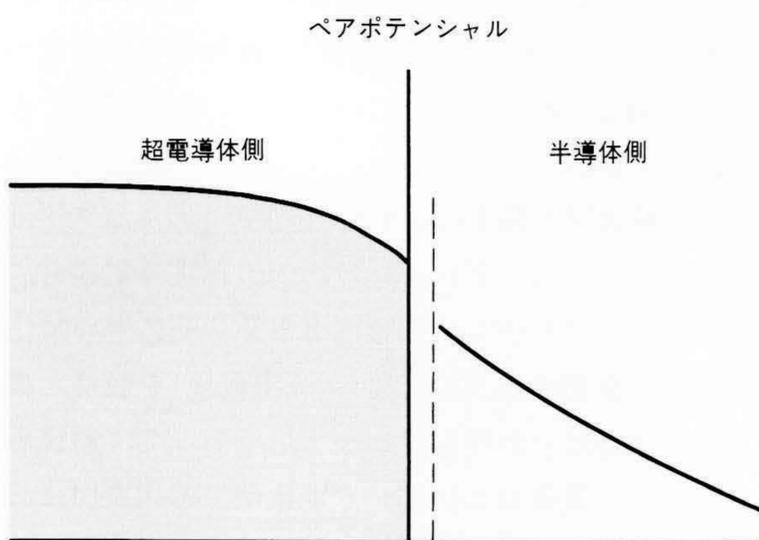


図2 超電導体と半導体の境界でのペアポテンシャルの変化(説明図) ペアポテンシャルは、半導体側で境界からの距離とともに減衰する。

よれば、半導体中のキャリアの移動度の平方根とキャリア濃度の立方根に比例する¹⁰⁾。このため、電界効果によって半導体中のキャリア濃度を増大させれば、超電導コヒーレンス長さ ξ が長くなり、したがって、半導体を介してソースとドレーン両電極間の超電導的な結合が強くなって、半導体を介して流すことのできる超電導電流の大きさを制御できる。

一定の温度で半導体を挟んで設けた二つの超電導電極(ソースとドレーン)の間に流すことのできる最大の超電導電流の値は、主として超電導電極間の距離 L と半導体中の超電導コヒーレンス長さ ξ によって決まっている。このうち超電導コヒーレンス長さ ξ は、すでに述べたように半導体の電気的な性質に強く依存する。この半導体を介して結合した二つの超電導電極と電界効果用の制御電極を持った素子の動作は、超電導電極間の距離 L と半導体中の超電導コヒーレンス長さ ξ とによって表1に示すように分類できる。

L が ξ よりも十分に小さい場合、および L が ξ と同程度の場合で半導体が縮退するほどに高濃度に不純物を含む場合には、二つの超電導電極の間にはジョセフソン素子が初めから形成されている。しかし、両電極間の結合が強いので、ゲート電極に電圧を印加しても特性は変化しないか、あるいは特性の制御に大きな電圧の印加が必要である。

L が ξ と同程度であって、かつ半導体が縮退していないときには、図3に示すようにゲート電圧 V_g の印加によって半導体のキャリア濃度を変化させると、これによって超電導コヒーレンス長さ ξ が変化する。したがって、ソース超電導電極とドレーン超電導電極からの超電導電子対の染み出す距離が変化し、両電極からの染み出しに重なりが生じ、しかもこの重なりを制御できる。このため、ソース電極とドレーン電極の間に流すことのできる超電導電流の最大値が変化する。つまり、電界効果形の超電導トランジスタが動作する。

L が ξ よりも十分に大きく半導体が縮退している場合には、ゲート電極に印加した電圧による特性の変化は小さく、ソース電極とドレーン電極の間も超電導的な結合を示さない。 L が ξ よりも十分に大きく、かつ半導体が縮退していないときには、

表1 半導体で結合した超電導電極と制御電極を持つ素子の動作の分類 動作は L と ξ の大小関係、半導体中のキャリア量によって分類できる。

半導体	L	$\xi \ll L$	$\xi \sim L$	$\xi \gg L$
	縮退		抵抗	ジョセフソン素子
非縮退		MOSトランジスタ	電界効果形超電導トランジスタ	ジョセフソン素子
フリーズアウト		高抵抗	電界効果形超電導トランジスタ	ジョセフソン素子

注：略語説明 L (超電導電極間の距離), ξ (超電導コヒーレンス長さ)

通常のMOSトランジスタと同様の動作をされると考えられる。

このように超電導トランジスタは、半導体中への超電導電子対の染み出しを電界効果で制御して動作するデバイスである。この動作は、超電導電子対の染み出しを量子論に従って波と考えると、両方の超電導電極からの超電導電子波の重なり合いを制御して、最大の超電導電流をコントロールしていると言える。ゲート電極に電圧を加えていない場合には、図3(a)に模式的に示したように、二つの超電導電極からの超電導電子波の重なりがないために、両電極間には常電導電流が流れて電圧が発生する。一方、ゲート電極に電圧を加えた場合には、同図(b)に示したように超電導電子波は重なり合うため、両電極間には超電導電子による超電導電流が流れ、電圧の発生がない。この動作は超電導電子波を制御することで、超電導電流をON, OFFすることに対応する。

3 超電導トランジスタの作製とその動作

本章では、集積化に適したプレーナ形超電導トランジスタの作製とその動作実験の結果について述べる。電界効果形の超電導トランジスタは、MOSトランジスタと類似の構造を持つ。したがって、MOS構造を実現しやすい材料として、半導体にはSiを選んだ。Si中の超電導コヒーレンス長さ ξ は約20 nmと小さいので、超電導的な結合を得るためには二つの超電導体の間の距離 L は、0.2 μm 程度まで接近させる必要があることが実験的にわかっている¹⁾。

超電導トランジスタの断面の走査電子顕微鏡写真を図4に示す。ゲート酸化膜は、熱酸化によって形成した厚さ10 nmの SiO_2 である。ゲート電極の加工は、電子線描画法によって形成したネガ形ホトレジスト(RD2000N：日立化成工業株式会社)のパターンをマスクにした反応性イオンエッチング法によって行った。ゲート電極は図1に示したように、 Si_3N_4 のひさしと、やはり Si_3N_4 の側壁絶縁膜を持つ。初めに、このようなひさし構造を持った制御電極を形成しておき、この上からヒ素イオンの打ち込みによって、半導体と超電導電極の良好な電氣的接触を得るための領域を形成した後に、超高真空中で

厚さ約800 nmの超電導体であるNbを蒸着する。蒸着後のNb薄膜は図1に示したように、ひさし構造を持ったゲート電極と自己整合的な形に形成され、自動的にソース超電導電極とドレーン超電導電極に分かれる。

超電導電極および配線パターンはNb薄膜を、ホトレジストをマスクにした反応性イオンエッチングによって加工して形成した。二つの超電導電極の間の距離は約0.1 μm 、電極の幅は60 μm である。約0.1 μm の超電導電極の間の距離、すなわち超電導トランジスタとしてのゲート長はこれまでの報告の中でもっとも短い。

電氣的特性の測定は試料を液体ヘリウム中に浸漬(し)して、温度4.2 Kで行った。試料のドレーン電圧 V_d とドレーン I_d 電流の関係をいくつかのゲート電圧 V_g の条件について測定した結果を図5に示す。ゲート電圧が0.3 V以下の場合には、二つの超電導電極の間に超電導電流は観測できないが、それ以上の電圧では電圧を大きくするに従って、半導体を介して流すことのできる最大の超電導電流 I_m の値は大きくなる。同図に示した電流-電圧特性は、典型的な弱結合形のジョセフソン素子の特性であり、その意味で電界効果形の超電導トランジスタは、特性を電圧で制御できるジョセフソン素子と言える。初めに述べたように、超電導トランジスタにはいくつかのタイプがあるが、同図に示したように直接に最大超電導電流 I_m の値を制御できるのは、現在のところ電界効果形超電導トランジスタだけである。このようにして測定した I_m の値と印加した V_g の値との関係を図6に示す。ゲート電極に印加した電圧が2 Vの場合には、最大の超電導電流 I_m は約28 μA であった。

このように、二つの超電導体の間を半導体を介して流れる超電導電流を制御することができた。この超電導トランジスタは、超高速で低消費電力のスイッチング素子として期待されている。現在は超電導体にNbを使っているために、素子を液体ヘリウム温度(4.2 K)まで冷却する必要がある。しかし、最近話題の酸化物超電導体を使えば、デバイスの冷却に経済的で安価な液体窒素(温度77 K)を利用でき、超高速の超電導コンピュータの実現がさらに容易になると期待される。

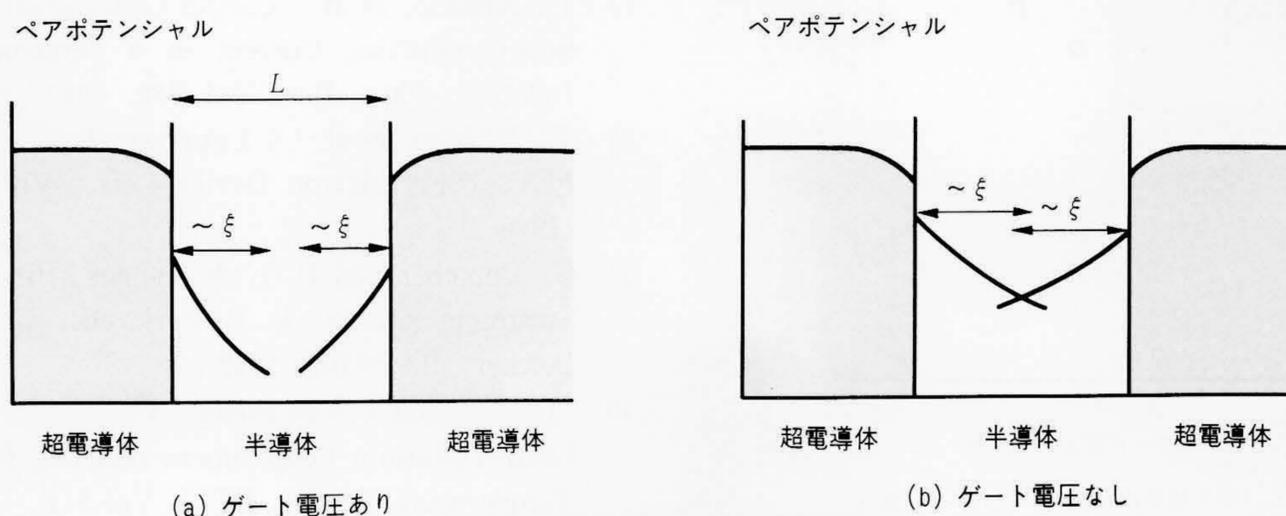


図3 超電導体-半導体-超電導構造での超電導近接効果の説明 ゲート電圧の印加によって、超電導コヒーレンス長さ ξ が変化する。

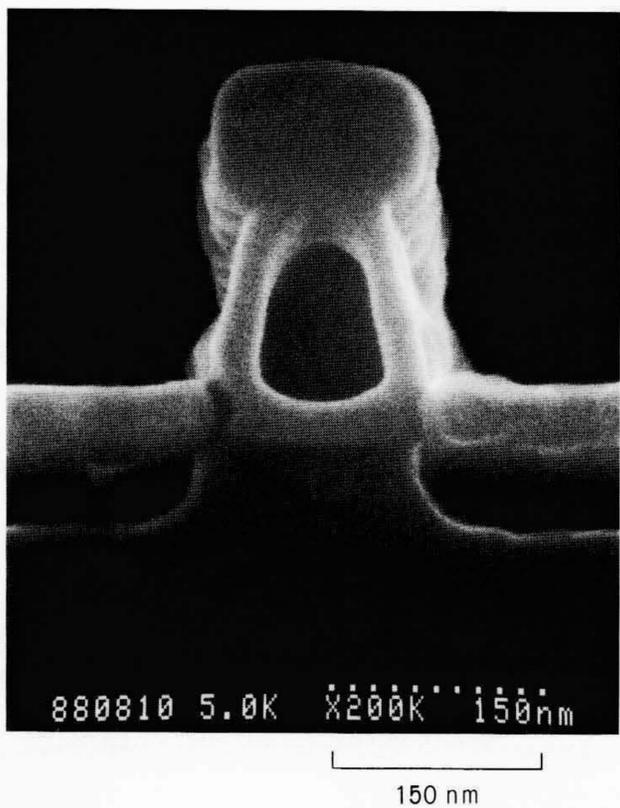
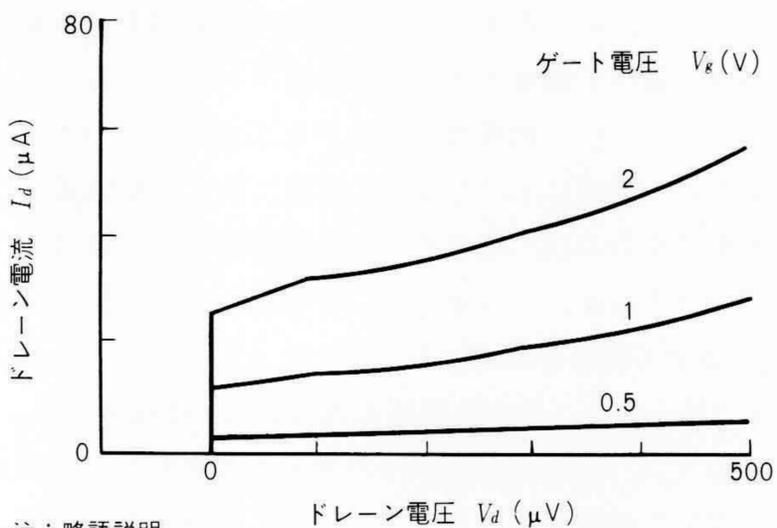
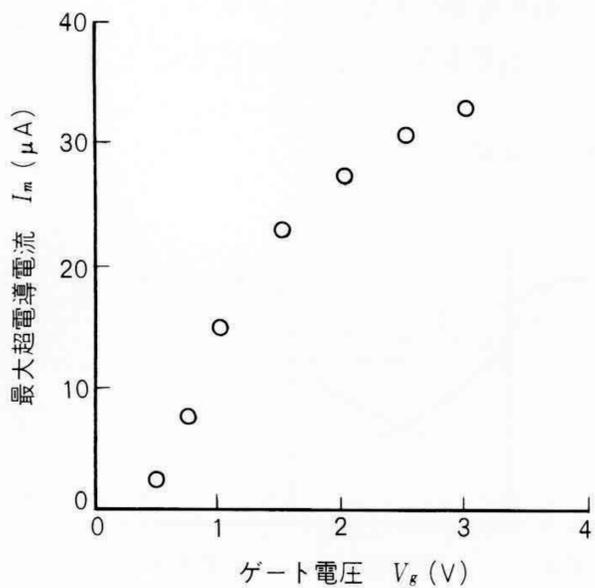


図4 試験素子の断面の走査電子顕微鏡写真 断面の化学処理によって、ヒ素イオン打ち込み部にコントラストを付けてある。



注：略語説明 I_d (ドレイン電流), V_d (ドレイン電圧), V_g (ゲート電圧)

図5 ドレイン電流 I_d とドレイン電圧 V_d の関係 $V_g=0.5\text{ V}, 1.0\text{ V}, 2.0\text{ V}$ に対応する測定結果を重ねて表示してある。



注：略語説明 I_m (最大超電導電流), V_g (ゲート電圧)

図6 最大超電導電流 I_m とゲート電圧 V_g の関係 I_m は V_g が 0.3 V 以上で観測でき、それ以降は V_g とともに増加する。

4 結 言

超電導材料の新しいコンピュータ用超電導デバイスへの応用を目的として、超電導体と半導体を組み合わせた電界効果形の超電導トランジスタの動作原理とデバイス特性について検討した。その結果、超電導電子波を制御し、超電導電流の最大値を変化させて動作する、超電導トランジスタが実現できた。動作原理実験に成功したのち、集積化に適したプレーナ構造の超電導トランジスタの開発を行った。半導体にSi、超電導体にNbを用い、超電導電極の間の距離、すなわち超電導トランジスタとしてのゲート長が約 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ の試験素子を作製し、その動作を液体ヘリウム温度(4.2 K)で確かめた。この超電導トランジスタは、消費電力と動作速度で従来のジョセフソン素子と同程度の性能を持つことに加えて、三端子デバイスであるため集積回路の構成が容易になり、超電導材料のエレクトロニクス応用を進める新しい技術として期待される。

参考文献

- 1) K. E. Gray : A Superconducting Transistor, Appl. Phys. Lett., Vol. **32**, 392~395 (1978-3)
- 2) 西野, 外 : 半導体結合ジョセフソン接合とゲート電極を有する超電導三端子素子, 応用物理, **54**巻, 10号, 1089~1094 (1985-10)
- 3) T. D. Clark, et al. : Feasibility of Hybrid Josephson Field Effect Transistor, J. Appl. Phys. Vol. **51**, 2736~2745 (1980-5)
- 4) T. Nishino, et al. : Three-terminal Superconducting Device Using a Si Single Crystal Film, IEEE Electron Device Lett., Vol. **EDL-6**, 297~299 (1985-6)
- 5) H. Takayanagi, et al. : Phys. Rev. Lett., Vol. **54**, 2449~2452 (1985-6)
- 6) Z. Ivanov, et al. : IEEE Trans. Magn., Vol. **MAG-23**, 711~713 (1987-2)
- 7) T. Nishino, et al. : Carrier Concentration Dependence of Superconducting Current in a Semiconductor Coupled Junction, Phys. Rev. Vol. **B33**, 2042~2045 (1986-2)
- 8) T. Nishino, et al. : $0.1\text{ }\mu\text{m}$ Gate-Length Superconducting FET, IEEE Electron Device Lett., Vol. **EDL-10**, 61~63 (1989-2)
- 9) G. Deutcher and P.G. de Gennes : Proximity Effect, in Superconductivity, R. P. Parks ed., New York, Marcel Dekker, 1005~1034 (1969)
- 10) J. Seto and T. Van Duzer : Theory and Measurement on Lead-Tellurium-Lead Superconducting Junctions, in Low Temperature Physics, LT13, Vol. **3** (K. D. Timmerhaus, W. J. O' Sullivan, and E. F. Hammel eds.), New York, Plenum press (1977-8)