

Title	半導体中での衝突電離による非線形現象--自発振動からカオスへ--
Author(s)	藤井, 研一; 大山, 忠司; 大塚, 穎三
Citation	大阪大学低温センターだより. 66 P.7-P.10
Issue Date	1989-04
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/3571
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

半導体中での衝突電離による非線形現象

—自発振動からカオスへ

教養部 藤井 研一、大山 忠司、大塚 穎三 (豊中5252)

束縛エネルギーの小さいドナー不純物を含む半導体試料を低温にすると伝導帯を動いていた電子は不純物に束縛される。ここに外部電場を加えると電場に依って加速された伝導電子は電子を束縛したドナー不純物に衝突し束縛電子をたたき出す。たたき出された電子は更に衝突に依って束縛電子をたたき出す、この様にして雪崩的に自由電子が増えることを衝突電離過程と呼ぶ。衝突電離を生じるような電場のもとではもはやオームの法則は成り立たず電流—電圧特性 ($I-V$ 特性) は大きな非線形性を有し負性抵抗も示す。このような電場領域では自発振動などの興味深い非線形現象が観測される。

青木ら¹⁾は80年代初頭にIII—V族半導体GaAsを外側から数十kHzのパルス電場で駆動した時に衝突電離による振動が現れることを見いだした。外部電圧を大きくするとこの振動のパターンは複雑に変化し、ついにはカオス状態を示した。これ以降、半導体中での衝突電離に基づくカオスの研究が活発に行われるようになり、 $Ge^{2,3)}$ 、 $GaAs^{4)}$ 、 $InSb^{5,6)}$ 等でカオス状態が観測され研究が続けられている。またScholl⁷⁾に依って伝導電子、不純物の基底状態及び励起状態を考慮した理論モデルも提案されている。しかしながら未だ充分な理解が得られる段階には至っていない。

$InSb$ は小さなバンドギャップを持つため非常に軽い有効質量を持ち、ドナー不純物の束縛エネルギーも非常に小さくなる。このため不純物準位は伝導帯の底から明瞭に分離せず、ヘリウム温度においても電子は伝導帯にある程度励起されている⁸⁾。しかし磁場を印加するとドナーの束縛エネルギーは磁場とともに大きくなり低温では電子はドナーに束縛されてしまう。これはMagnetic Freeze-out効果と呼ばれている。この効果に依ってドナーの基底状態をコントロールでき、さらには励起状態も伝導帯より分離できるかも知れない。自発振動からカオスへ至る道筋は不純物状態に敏感であるので、衝突電離過程によるカオスに対する磁場効果を調べることで不純物の励起状態の情報も得られるのではと言うのがこの研究の動機になっている。

実験は不純物濃度の異なる数種類のn型 $InSb$ を用いた($Nd \sim 1 \times 10^{17} cm^{-3}$)。

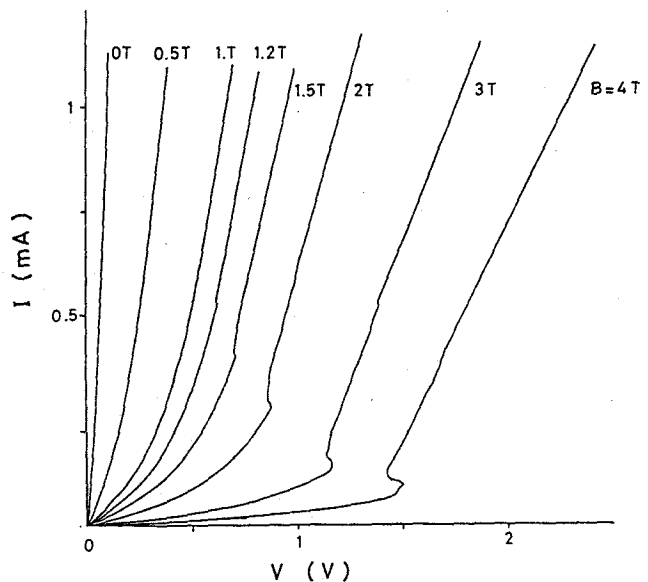


図1 $InSb$ の $I-V$ 特性の磁場変化。

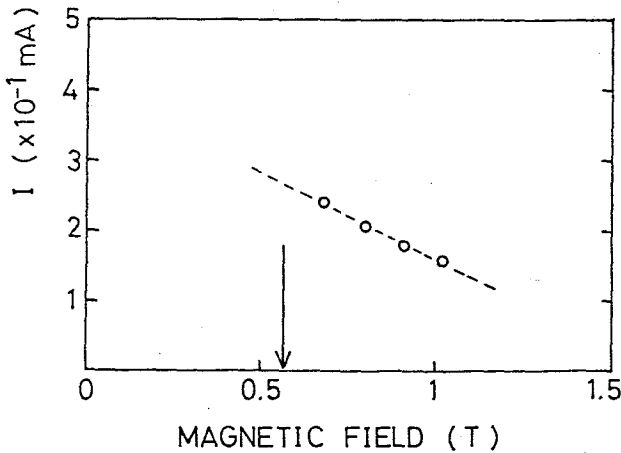
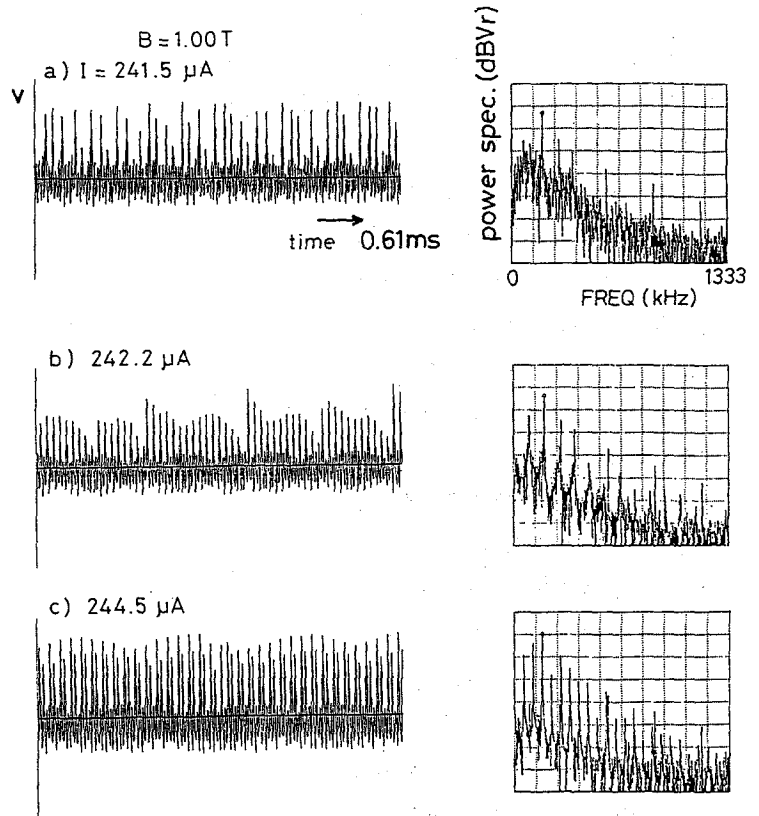


図2 自発振動が最初に観測される電流値の磁場変化。

が増すにつれて振動の観測される電流値が低くなることが分かる。此処で最初に振動の観測される磁場位置0.65テスラは上に述べたmagnetic freeze-outが生じる磁場位置(0.5テスラ)⁹⁾よりもやや高くなっているがこの磁場では振動のパターンの変化は観測できなかった。

磁場を固定して試料に流す電流を増していくと様々なパターンが得られる、図3に印加磁場1.00テスラに於ける電圧の振動パターンの変化の一例を示す。振動の時間変化とその周波数スペクトルを示した、a)、b)、c)の順に周波数成分の線スペクトルが2倍、4倍と増していくのが分かる、そしてd)では振動

試料両端での電圧降下の振動成分はトランジェントメモリーを用いて0.3 μ s間隔で4096点取り込んでコンピュータで処理した。図1に磁場を4テスラ迄変えた時のI-V特性を示す。高磁場になるとS字形をした負性抵抗領域を明瞭に認めることができる。振動はこの領域で観測されたが負性抵抗領域が明瞭には認められない弱磁場に於いても自発振動は観測できている。図2には自発振動が最初に観測された電流値を印加磁場に対してプロットしている。磁場が0.56テスラ以下では振動は観測されなかった(図の矢印)。



がかなり不規則になってきており周波数スペクトルもブロードな成分が成長しているのが分かる。この様に周波数成分が倍化して最終的にブロードな成分だけのカオスに成る道筋はFaigenbaum⁹⁾により見いだされたものでカオス状態を定量的に扱うことを可能にしたものである。

更に定量的な議論のためにはTakens¹⁰⁾の埋め込みの方法を用いて相空間上の軌跡(アトラクター)を再構成する必要がある。これは測定した時系列データ x_1, x_2, \dots, x_n (今は交流電圧信号)からベクトル $x = (x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+d})$ ($i = 1, 2, \dots$)で張られる空間を作ることによって可能になる。ここで d は埋め込み次元と呼ばれる。図4に $d=2$ のマッピングを示す。印加磁場は1.02テスラである。電流と共に軌跡が複雑になり、軌跡の畳み込まれている様子が分かる。この軌跡よりアトラクターの次元を求めることが出来る¹¹⁾。これは相空間上で相関積分 $C(r)$ が距離 r のべき乗に比例する時そのべき係数として求まる(図のプロットでの直線の傾き)。もし観測しているものがホワイトノイズならばこのべき係数は埋め込み次元 d とともに増大す

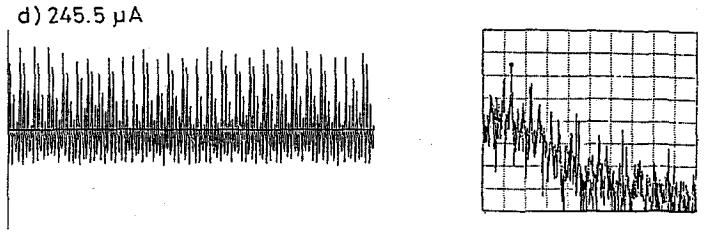


図3 1.00テスラでの電圧の自発振動成分とその周波数スペクトルの電流変化。

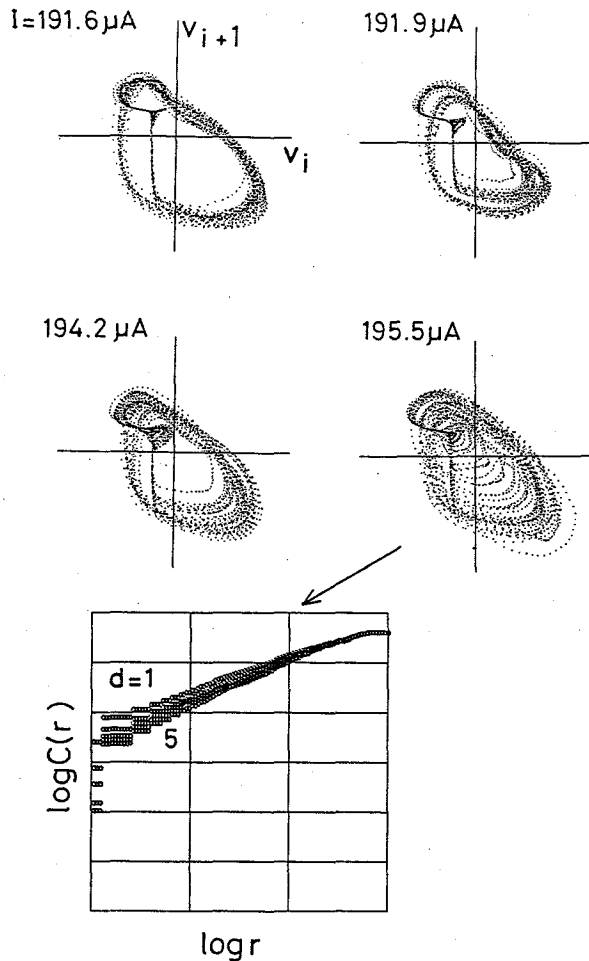


図4 自発振動信号から求めた $d=2$ の相空間でのマップの電流変化と相関積分 $C(r)$ の距離 r に対するプロット。傾きがアトラクターの次元を与える。

るがカオス状態に対しては収束する。 $I=195.5 \mu A$ のデータに対しアトラクターの次元は d に対して収束し0.73と求まり、この系の自由度はたいへん低いことが分かる。またこの次元は磁場に依存した変化を示し0.79テスラではほぼ1.5となる。これは磁場の強さとともにmagnetic freeze-outの効果が強まり、系が強い秩序状態に向かっているためと考えられる。

半導体のカオスの研究は始まったばかりであるが、半導体は電場、磁場、外部光（遠赤外光）等により精密なコントロールが可能な系であると考えられる。そのためカオス研究自体にとっても良い舞台を提供すると思われる。また逆にカオス現象の研究から半導体物性の知見（不純物準位の磁場依存性など）も期待できるであろう。

参考文献

- 1) K. Aoki, T. Kobayashi and K. Yamamoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **51** (1982) 2373.
- 2) S. W. Teitsworth, R. M. Westervelt and E. E. Haller, *Phys. Rev. Lett.* **51** (1983) 825.
- 3) J. Peinke, A. Muhlbach, R. P. Huebener, J. Parisi, *Phys. Lett.* **108A** (1985) 407.
- 4) G. N. Maracas, W. Porod, D. A. Johnson and D. K. Ferry, *Physica.* **134B** (1985) 276.
- 5) D. G. Seiler, C. L. Littler, R. J. Justice and P. W. Milonni, *Proc. 17th ICPS*, ed. J. D. Chadi and W. A. Harrison (Springer, New York, 1985) p. 1385.
- 6) K. Fujii, T. Ohyama and E. Otsuka, *Appl. Phy.* **A48** (1989) 189.
- 7) E. Schöll, *Physica.* **134B** (1985) 271.
- 8) S. Ishida and E. Otsuka, *J. Phys. Soc. Jpn.* **46** (1979) 1207.
- 9) M. J. Faigenbaum, *J. Stat. Phys.* **19** (1978) 25.
- 10) F. Takens, *Lect. Note in Math.* **898** (Springer 1981) 336.
- 11) P. Grassberger and I. Procaccia, *Phys. Rev. Lett.* **50** (1983) 153.