トンネルダイオードを用いた液体ヘリウム温度 高安定発振回路

柿崎 明人* 藤田 敏三**

* 東北大学大学院理学研究科博士課程在学

** 東北大学理学部 仙台市片平2の1の1

(1974年6月10日受理)

“Stabilized Tunnel Diode Oscillator”

AKITO KAKIZAKI and Toshizo FUJITA

Department of Physics, Faculty of Science, Tohoku University
Katahira 2-1-1, Sendai

(Received June 10, 1974)

Synopsis :

A low power tunnel diode oscillator with high frequency stability, which operates at liquid helium temperatures is reported. The stability of the oscillating frequency is affected not only by the current flowing in the diode, but also the stability of temperatures of the circuit. Many attempts to stabilize the frequency are discussed here. One of the results of the density of He^3 - He^4 mixtures (15% He^3 - He^4), measured by this circuit, is also reported.

§1 はじめに

われわれは、 He^3 - He^4 混合溶液の密度を、ヘリウム温度域で働く高周波発振回路の中に試料ヘリウムを入れ、密度の変化（すなわち、誘電率の変化）を、周波数の変化として検出する方法で測定した。

このとき、ヘリウム温度域で働く高周波発振器に、トンネルダイオード（エサキダイオード）を使用した。

ヘリウム温度域で働く発振器は、MOSFET を用いても製作できる¹⁾。しかし、東芝の 3SK35, NEC の 3SK40 など数種の MOSFET について、ヘリウム温度での特性をしらべた結果、これらの MOSFET を発振器に用いた場合、出力信号が大きいという利点はあるものの、MOSFET による発熱が数 mW にもなっており、低温で熱測定もしようとするときはあまり望ましくないことがわかった。

トンネルダイオードを使った回路では、回路自体が単純で、しかも全体を非常に小さくできること、安定

した周波数が得られること、回路に流れる電流による発熱が約 $20\mu\text{W}$ と、MOSFET を用いた場合に比べて非常に小さいことなど多くの利点をもっている。

すでに、この種の発振器は、低温物理学の分野で数多く使用されているが²⁾、この小文では、発振周波数の安定化なども含めて整理してみたい。

§2 トンネルダイオード（エサキダイオード）

トンネルダイオードは、 $10^{19}/\text{cm}^3$ 程度の高い不純物濃度をもった p 型半導体と n 型半導体とを、非常に薄い領域（約 $100\text{\AA}$ ）pn 接合をつくったもので、量子力学的なトンネル電流による負性抵抗特性を示す。

トンネルダイオード pn の接合のエネルギ準位は、Fig.1 のように、フェルミ準位が p 型の方は価電子帯に、n 型の方は伝導帯の中にある。このため、順電圧をある程度加えても、n 型の方の伝導帯の底が p 型の方の価電子帯よりも高くなるまでは、トンネル電流が流れる。さらに電圧を増していくと、トンネル電流は

Fig. 1 Typical energy level of tunnel diode

Fig. 2 Characteristic curve for BD-5

Fig. 3 Characteristic curve for 1S1200A

減って、普通の p 型と n 型の半導体の伝導帯間の電子の流れや、価電子帯間の正孔の流れが増加する。

室温では、このほかに、熱的に励起された電子や正孔による伝導も付け加わるが、トンネルダイオードの負性抵抗は、室温でもヘリウム温度でも存在する。

Fig. 2 と Fig. 3 に、GE 社の BD-5 と NEC の 1S1200A の室温及び低温での電圧—電流静特性を示す。

トンネルダイオードの電流の極大値と極小値は、接合部の大きさなどによって変化し、その大きさに応じ

て、多くの種類のトンネルダイオードが市販されている。

BD-5, 1S1200A のほかにも、1N3712, 1S1198A など、いくつかのトンネルダイオードについても同様の測定を行ったが、§1 でも述べたように、できるだけ発熱を少なくする必要から、電流極大値の小さい GE 社の BD-5 を用いることにした。

§3 使用したそのほかの回路素子

まず、抵抗であるが、低温で安定した動作をさせるには、できるだけ温度変化の小さいものがよい。それに、発振回路に使用するのだから、インダクタンスをもっているものは望ましくないので、金属被膜抵抗を使用した。金属被膜抵抗は、温度変化の小さいことで知られているが、実際に市販されているもの（トーコー電気 KK）について測定してみると、1K 当り 0.02 ~ 0.3% の抵抗値の変化 (Fig. 4) があつた。われわれは、その中から特に変化の小さいものを選んで使用した。

なお、被膜に使われている金属が低温で超伝導になってしまったり、被膜にラセン状の溝が彫られているものがあるので注意しなくてはならない。

次にコンデンサーであるが、マイカコン、チタコン、フィルムコンなどが使用できる。室温とヘリウム温度とでは容量に変化があるが、今回の使用目的に関する限り問題はなかった。

低温で使用する回路素子は、室温とヘリウム温度との間の熱サイクルを繰り返すことになるので、それによる破損には十分気を付けなければならない。急激な冷却や加熱はできるだけさけた方がいい。

個々の製品にもよるだろうが、使用したトンネルダイオードのうちの一個は、約 20 回の熱サイクルの後、

Fig. 4 Temperature dependence of film resistor

Fig. 5 Characteristic curve for degraded BD-5

Fig. 5 のように電流の極大値を失ってしまったし、金属被膜抵抗の中には2～3回でだめになってしまうものもあった。接合部や、素子のリード線の付け根のところが破損するようである。

§4 発振回路と発振周波数の安定化

Fig. 6 に、 $\text{He}^3\text{-He}^4$ 混合溶液の密度を測定するのに用いた発振回路を示す。

R_1 , R_2 は、トンネルダイオードの動作点が負性抵抗のほぼ中間 (約 100mV) になるようにするためのもので、 R_2 の値は、バイアス電圧の安定化も考えて、ダイオードに流れる電流の約10倍の電流が流れる大きさに選んである。

回路のQが高ければ高いほど、トンネルダイオードの負性抵抗の広い領域にわたって発振させることができる。

C_s は、試料となる液体ヘリウムを入れるコンデンサーで、 50μ のすきまのある円柱状のコンデンサー部分をもった約 1.5cc の無酸素銅でできた容器である。

L は、0.25φ の銅線を巻いて作ったコイルで、形がずれたりグラグラしたりしないように、表面にうすく絶縁ニス (GE 社 No. 7031) を塗っている。

Fig. 6 Tunnel diode oscillator

C_0 は外からの影響をおさえるためのもので、大きいほど影響を小さくできるが、大きすぎると、取り出す信号が小さくなってしまふ。われわれの場合、発振回路と周波数カウンタとの間に、約 60dB のゲインを持つ自作アンプを入れているので、 $0.1\mu\text{F}$ の大きさにすることができた。発振回路からの信号の大きさは、 V_{p-p} が約 $200\mu\text{V}$ である。

4.2Kにおいて、 C_s に試料の入っていないときの発振周波数の時間変化を Fig. 7 に示す。時間は、回路を電源につないでから数えている。約1時間で、 2×10^{-7} の安定度が得られる。この1時間には、電源である鉛蓄電池が安定に動作するまでの時間と、回路全体が一定の温度になるまでの時間とがふくまれている。あらかじめ、電池が安定に動作するようにウォーミングアップしておいてから回路につなぐと、約20分に短縮できる。

安定した周波数を得るのに最も大切なことは、回路素子と、それに直結するリード線をしっかり固定することである。われわれは、回路を組み込んだプリント基板を、試料の入るコンデンサーにネジで固定して安定化をはかった。

Fig. 7 Time dependence of oscillator

Fig. 8 Temperature dependence of oscillator

Fig. 9 Molar volume of 15.0% He³-He⁴ mixture near its T_λ

また、トンネルダイオードの動作点がずれると周波数は変化するので、回路の電源には安定度の高い鉛蓄電池を使用している。今回製作した回路は、バイアス電圧が1%変化すると、周波数は約0.001%だけ変化する。

一方、§3でも述べたように、金属被膜抵抗はわずかであるが抵抗値に温度依存性がある。そのため、発振周波数も温度によって変化し (Fig. 8), 0.1 K 以上の温度範囲で測定しようとするときには、回路全体が一定の温度になるような工夫をしたり、データからその変化分を差し引く較正をしなければならない。

§5 おわりに

以上述べたような回路に、He³-He⁴混合溶液を入れて、周波数の変化を Clausius-Mossotti の式を使って密度の変化になおして得られたデータの一例を Fig. 9

に示す³⁾。(図では、密度をモル体積になおしている) この方法だと 10⁻⁴ cm³/mole の分解能がある。

トンネルダイオードを用いた発振回路は、このほかにも、超低温での圧力計、高周波帯磁率の測定などに利用されているが²⁾、この小文が、低温での高周波発振回路を計画されている方々の御参考になれば幸である。

なお、今回使用した GE 社の BD-5 は、GE 社の Scientific Representative-Asia, Dr. M. J. Moore からいただいたものである。心からお礼を申し上げる。また、多くの有益な助言をいただいた、東北大学理学部の大塚泰一郎教授にも感謝申し上げる。

参考文献

- 1) F. E. Kingston and K. Lee : Rev. Sci. Instrum. 39 (1968) 599
津田俊信, 千葉明郎, 平井章 : 超低温抵術 1 No. 8 (1971) 56
- 2) 圧力計については,
J. F. Jarvis, D. Ramm and H. Meyer : Phys. Rev. 170 (1968) 320 など。
帯磁率の測定については,
R. B. Clover and W. P. Wolf : Rev. Sci. Instrum. 41 (1970) 617 など。
- 3) 液体ヘリウムの密度測定については
C. Bogoshiar, H. Meyer and J. Rives : Phys. Rev. 146 (1966) 110
G. E. Watson : Ph. D. Thesis, Cornell University (1969) (unpublished)
にくわしい。