

pn 接合固体プラズマ素子におけるマイクロ波発振

鎌倉 勝利*

Microwave Oscillations in pn-Junction Solid State Plasma Devices

By Katsutoshi Kamakura*

Synopsis: We clarify experimentally the properties on microwave oscillations in pn-junction solid state plasma devices which are fabricated by the alloy junction, thermal diffusion and liquid phase epitaxial method. The bulk of InSb has been used in the experiments on the microwave emissions from the solid state plasma in the high electric and magnetic fields which have been reported so far and most of the observed emissions have been microwave noise. In this paper, we describe coherent microwave oscillations in the pn-junction devices of InSb and InAs. The microwave oscillations are observed in the breakdown region of the devices under the applications of the DC reverse bias voltage of several V and transverse magnetic field of a few kG. In this region the electron-hole plasma is formed by an impact ionization. Frequencies of oscillation are varied in the wide range of microwave by varying the sample currents and external magnetic fields (frequencies from 4.3 to 7.3 GHz in the case of InSb pn-junction device at 77K, frequencies from 1.3 to 3.3 GHz in the case of InAs pn-junction device at 300K). Especially, we discuss the applications of engineering on the InAs pn-junction solid state plasma device because continuous coherent microwave oscillations are generated by the device at room temperature.

要旨: 合金法、熱拡散法および液相成長法を用いて製作した InSb および InAs の pn 接合固体プラズマ素子におけるマイクロ波発振特性を実験的に明らかにしている。従来報告されている高電界、高磁界における固体プラズマからのマイクロ波放射に関する実験では InSb のバルクを用いており、その観測された放射の多くはマイクロ波のノイズである。本論文では、InSb および InAs の pn 接合素子におけるコヒーレントなマイクロ波発振について述べている。マイクロ波発振は数 V の DC 逆バイアス電圧および数 kG の横磁界を印加した状態で素子のブレイクダウン領域において観測される。この領域では衝突電離により電子正孔プラズマが生成されている。発振周波数は素子電流および外部磁界を変化することによりマイクロ波領域で広範囲に変化する (InSb の pn 接合素子の場合 77K で周波数が 4.3 から 7.3 GHz, InAs の pn 接合素子の場合 300K で周波数が 1.3 から 3.3 GHz まで変化する)。特に InAs の pn 接合固体プラズマ素子は常温で連続的でコヒーレントなマイクロ波発振が生じることにより工学的応用面について検討している。

1. ま え が き

Larrabee と Hicinbotham¹⁾が InSb からのマイクロ波発振を初めて観測して以来、InSbのマイクロ波発振に関する数多くの報告が提出されている²⁾⁻¹¹⁾。彼らは導波管に InSb のバルク素子を挿入し、液体窒素温度(77K)でパルス電界と外部 DC磁界を素子に印加することにより、電界が200 V/cm 以上、磁界が3 kG以上でマイクロ

波が放射されることを報告した。観測された発振周波数はマイクロ波領域で広帯域におよび、発振はノイズ的である。また InAs においても数少ないが同様なマイクロ波発振が報告されている¹²⁾。InSb に電界を200 V/cm以上印加すると impact-ionization により電子正孔対が生成され固体プラズマ状態になり、avalanche breakdownを生じる。その後、InSbの固体プラズマからのマイクロ波発振に関する報告^{2),9)}が多数提出されたが、その発振機構に関する統一的な見解は今だ明確にされていないと思われる。筆者の見解によれば、その主な理由は発振がノイズ的であるため詳細なデータが得られず、現象を解

*電気工学科 助教授 工学博士
Assistant Professor, Electrical Engineering Division
Dr. of Engineering

析することが困難であると考えられる。最近では、表面に溝を付けた InSb の素子⁴²⁾、電極間距離を短かくした非常に薄い InSb の素子⁵¹⁾ からのコヒーレントなマイクロ波発振の報告も提出されている。

以上は高電界 (200 V/cm 以上) における発振現象であるが Larrabee らの報告の直後、Buchsbaum ら^{63), 71)} は 10 数 V/cm の低電界でも InSb からマイクロ波が放射することを報告している。また Eidson ら⁸⁾ および Musha ら⁹⁾ は低電界において Buchsbaum らが観測した広帯域発振の他に帯域の狭いコヒーレントな発振を観測している。10 数 V/cm の電界では InSb は avalanche breakdown を生じないことにより、固体プラズマからのマイクロ波発振であるとは考え難い。その後、Buchsbaum らが観測したマイクロ波発振は電子と音響フォノンとの相互作用による発振現象であることが明らかにされた。他方 Eidson らが観測したコヒーレントな発振については、Musha ら¹⁰⁾ および Tacano ら¹¹⁾ が発振周波特性を実験的に詳細に解析し、helical instability¹³⁾ に関係していることを報告している。彼らは低電界におけるコヒーレントなマイクロ波発振は素子の電極部分に関係があり、非オーミックコンタクトでの局所的なブレイクダウン領域で生じている固体プラズマが発振に帰与していることを示した。

以上は全て InSb (または InAs) のバルク素子を用いた発振現象であるが、筆者は低電界におけるマイクロ波発振が非オーミックコンタクトで生じた固体プラズマに関係していることに着目し、最近 InSb の pn 接合部分で生じる個体プラズマからマイクロ波を放射させる実験を試みた。その結果 InSb の pn 接合素子に液体窒素温度 (77 K) で DC 逆バイアスを数 V 印加してブレイクダウンを生じさせ、ブレイクダウン領域の固体プラズマに外部 DC 磁界を数 kG 印加したところ、コヒーレントなマイクロ波発振を観測することができた^{14), 15)}。さらに固体プラズマ素子として InSb の次に有望な InAs についても同様の実験を試みたところ、InAs の pn 接合素子においてもコヒーレントなマイクロ波発振を得ることができた^{14), 15)}。特に InAs の pn 接合素子の場合には常温 (300 K) においても発振が観測されている。これらの pn 接合固体プラズマ素子の特徴を以下に示す。

- (1) 発振がコヒーレントなこと
- (2) パルス電界の代りに DC 電界を用いていること (DC 動作可能)。
- (3) 発振周波数が素子電流および外部磁界を変化させることにより広範囲に変化でき、さらに任意の周波数を選べること。

- (4) 特に InAs の pn 接合素子の場合には常温で発振が可能であること。

従来の InSb (または InAs) の固体プラズマからの発振現象はその多くがパルス動作で発振がノイズ的であり、さらに極低温 (77 K) を必要とすることにより、その興味ある対象は理学的範囲に留まっていたと思われる。しかしながら pn 接合固体プラズマ素子は上に述べた特徴があり、特に InAs の pn 接合固体プラズマ素子は常温で連続動作が可能であることにより工学的応用面にも有望であると考えられる。

本論文では初めに InSb および InAs の pn 接合素子の製作について述べる。InSb の pn 接合の製作は合金法および熱拡散法を用いた。InAs の pn 接合では上記の方法の他、液相成長法を用いている。次に外部磁界を印加した場合の pn 接合固体プラズマ素子の電圧電流特性および発振特性を実験的に明らかにし検討している。さらにこのような pn 接合固体プラズマ素子の工学的応用面の有効性について述べている。

2. pn 接合素子の製作

pn 接合素子の製作に用いた基板は n 形の InSb および InAs の半導体単結晶である。表 1 にこれらの単結晶の代表的な物理定数を示す。表 1 に示す物理定数は、InSb の場合は液体窒素温度 (77 K)、InAs の場合は常温 (300 K) における値である。基板はこれらの単結晶のインゴットからワイヤーソーを用いて適切な大きさのスライスに切り出している。pn 接合の製作で使用した基板の表面は (111) 面である。基板の表面処理は次に示す手順で行なっている。

- (1) #4000 のカーボランダムを用いて表面を研磨して厚さが一定 (200 μm 程度) にした後、#8000 のカーボランダムを用いて表面をさらに研磨して良好な鏡面を得る。
- (2) InAs の基板は(1)の処理後、0.5%Br+メチルアルコールの溶液を用いて Mechanical Chemical Polish を行なう。
- (3) 超音波洗浄を十分に行なった後、研磨によって生じた表面加工層を取り除くためにエッチングを行なう。エッチング液は InSb の場合 CP-4 (HNO_3 : HF : CH_3COH = 5 : 3 : 3) を用い、InAs の場合は上記の 0.5%Br+メチルアルコールを用いる。エッチング時間は数 10 秒から 1 分程度である。

以上の表面処理の後、基板に合金法、熱拡散法および液相成長法を用いて pn 接合を形成する。次に pn 接合素子の電極を作るために、金を基板に直径 125~600 μm

表 1 半導体単結晶の物理定数

単結晶名	n-InSb (77K)	n-InAs (300K)
物理定数		
キャリア密度 (cm^{-3})	$(5.7 \sim 9.0) \times 10^{18}$	$(2.1 \sim 2.2) \times 10^{16}$
移動度 ($\text{cm}^2/\text{v.s}$)	$(5.6 \sim 6.5) \times 10^5$	$(2.34 \sim 2.35) \times 10^4$
比抵抗 ($\text{ohm} \cdot \text{cm}$)	0.125~0.170	0.012~0.013

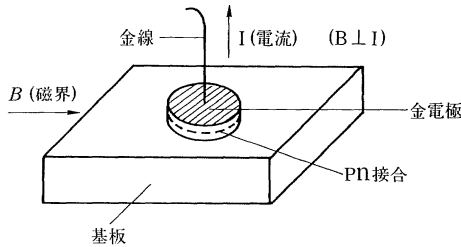


図 1 pn 接合固体プラズマ素子の形状

の大きさに真空蒸着装置を用いて蒸着した後、窒素中で $200 \sim 250^\circ\text{C}$ 、 $1 \sim 1.5$ 時間熱処理を行う。さらに素子を適切な大きさに切り出し、セラミック板に固定した後、超音波併用の熱圧着ボンダーを用いて $25 \mu\phi$ の金線を電極部分に取り付ける。最後に素子のリーク電流を防ぐためにエッチング液でメサ形にエッチングを行なう。以上の方法で製作した pn 接合素子の形状を図 1 に示す。

次に本実験で行なった pn 接合の製作法について述べる。InSb の pn 接合の製作では合金法および熱拡散法を用いた。また InAs の pn 接合の製作では上記の方法の他に、主に液相成長法を用いている。合金法および熱拡散法に関しては InSb の pn 接合の場合、液相成長法に関しては InAs の pn 接合の場合について以下に述べる。

(A) 合金法

合金法では溶媒金属としては In、P 形を作る不純物として Zn を用いている。 $600 \mu\phi$ の穴のあいたマスクを基板に密着して、真空蒸着装置により初めに Zn を次に In を蒸着する。この場合一枚の基板の上に $600 \mu\phi$ の Zn と In の円形の蒸着膜が数個できる。蒸着後、基板を窒素中で温度 400°C 一定で 15 分間保った後、1 分間に 15°C の割合で 200°C まで直線的に温度を下降させて合金処理を行う。その後は自然冷却として常温まで下降する。

(B) 熱拡散法

合金法と同様の手順で Zn と In を基板に蒸着した後、基板を窒素中で温度 300°C 一定で 5 時間加熱して Zn を基板に拡散する。

(C) 液相成長法

液相成長法はスライドボード方式を用いている。成長溶液は基板と同じ材料の InAs を使い、溶媒金属として In、P 形を作る不純物として Zn を用いている。溶液の組成は $\text{In} + 5.5\% \text{InAs} + 0.05\% \text{Zn}$ である。即ち本実験で用いた溶液は In ; 1 g, InAs ; 55 mg, Zn ; 0.5 mg である。初めに In, InAs および Zn をスライドボードの溶液槽に入れ、ボードを液相成長装置の炉管内に固定し、精練された高純度の水素中で 700°C 、2 時間加熱して、In の溶液に十分 InAs, Zn が溶け込むよう熱処理を行なう。次に InAs の基板を上記の溶液と共にスライドボードに入れ、ボードを炉管内に再び固定し、水素中で 500°C 一定の温度で 1 時間加熱した後、基板が溶液槽の真下に位置するようにボードを移動して基板と溶液を接触させる。同時に温度を 500°C から下降して成長を開始する。温度は 1 分間に 10°C の割合で直線的に下降させ、 300°C でボードを再び移動して基板と溶液を離し成長を終了させる。この状態で溶液中の過飽和となった InAs が基板に成長している。その後は自然冷却して温度を常温まで下降する。

3. 測定装置および測定方法

図 2 に pn 接合個体プラズマ素子の諸特性の測定に用いた装置のブロックダイアグラムを示す。素子への DC バイアスの供給源は、pn 接合のブレークダウン状態を測定するため、高インピーダンスの安定化定電流源を用いている。素子の電圧電流特性の測定には X-Y レコーダを用いている。素子には DC バイアスが印加し、スペクトルアナライザには素子から発生した交流成分のみが印加されるようにバイアスインサージョンユニットを用いている。スペクトルアナライザは周波数が 10 MHz から 22 GHz まで直接分析できる高感度の HP8565A を用いている。測定素子はサンプルホルダ内に挿入され、ホルダは電磁石内に固定されている。サンプルホルダとバイアスインサージョンユニットおよびスペクトルアナライザ

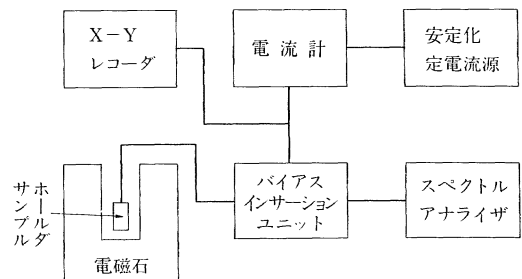


図 2 測定に用いた装置のブロックダイアグラム

イザ間は全てインピーダンスが 50Ω の同軸ケーブルで接続されている。サンプルホルダ内の素子は図1に示すように素子電流と外部磁界の方向が直交するように位置を回転し調整している。

電圧電流特性の測定においては、素子電流は素子と電源の間に 1Ω の直列抵抗を挿入し、その端子電圧をX-Yレコーダを用いて直接記録している。発振周波数およびスペクトル波形は上記のスペクトルアナライザを用いて直接測定している。測定はInSbのpn接合素子の場合には全て液体窒素温度(77 K)、InAsのpn接合素子の場合には主に常温(300 K)で行なっている。

4. 測定結果

4.1 InSbのpn接合固体プラズマ素子の諸特性

図3にInSbのpn接合素子に逆バイアスを印加した場合の電圧電流特性(V-I特性)を示す。外部磁界Bは素子電流方向に対して垂直に印加している。図3は合金法で製作したpn接合素子の代表的特性であるが、熱拡散法で製作したpn接合素子もほぼ同一の特性を示している。外部磁界 $B=0$ の場合は電圧が約 -2.5 V でブレイクダウンが生じている。外部磁界が増加するとブレイクダウンを生じる電圧の絶対値が増加する傾向がある。この傾向はInSbのパルク素子でみられる特性と同様で磁気抵抗効果に帰因すると考えられる。図4に上記の素子の発振周波数特性を示す。電流Iは絶対値(正の値)で示している。以下発振周波数特性における電流は同様に扱う。発振周波数特性は図3に示したV-I特

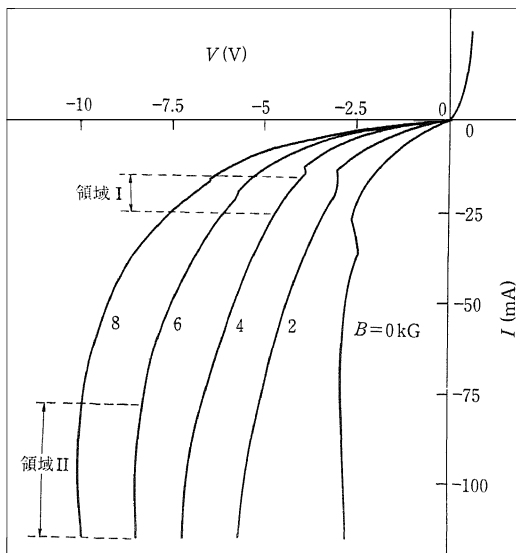


図3 逆バイアスを印加した場合の電圧電流特性

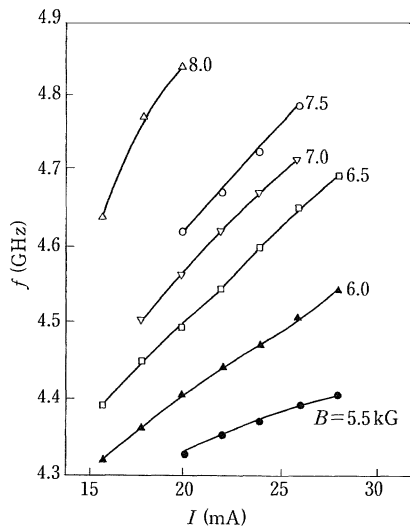
性における電流の範囲で二種類(領域Iおよび領域II)に区別される。領域Iではブレイクダウンがpn接合の一部で生じている。この領域ではV-I特性に局所的なブレイクダウン特性が現われている。領域IIではpn接合全体で完全にブレイクダウンが生じている。図4(a)は領域Iにおける発振周波数 f の電流依存性を、図4(b)は発振周波数の磁界依存性を示している。マイクロ波発振は素子電流方向に対して外部磁界を垂直に印加した場合(横磁界)、 $B=5.5\text{ kG}$ 以上で生じる。素子電流方向に対して外部磁界を平行(縦磁界)に印加した場合は発振は観測されない。素子電流および外部磁界が増加すると共に発振周波数が増加している。図4(c)は領域IIにおける発振周波数の電流依存性を、図4(d)は発振周波数の磁界依存性を示している。領域IIにおける発振では電流が増加すると発振周波数が減少している。また発振周波数は電流および外部磁界を変化することにより $4.3\text{ GHz} \sim 7.3\text{ GHz}$ と広範囲に変化することがわかる。このようにpn接合固体プラズマ素子の特徴としては素子電流および外部磁界を変化することにより発振周波数がマイクロ波領域において広範囲に変化することが掲げられる。

領域Iおよび領域IIにおける発振現象は共に固体プラズマにおける不安定性に関係していると考えられる。領域Iでは接合面の不完全性等による局所的なブレイクダウン状態での固体プラズマが、また領域IIでは接合全体で生じるブレイクダウン状態での固体プラズマが発振に帰与していると思われる。特にブレイクダウン特性がハードでブレイクダウンが生じる以前のV-I特性が滑らかなpn接合素子においては領域Iにおける発振は観測されていない。これは接合が良好で局所的なブレイクダウンが生じなく、固体プラズマが生成されていないことによると考えられる。

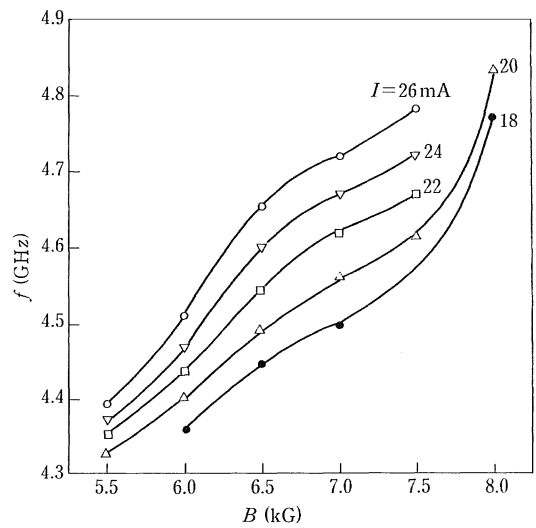
熱拡散法によって製作したpn接合素子も合金法の場合とはほぼ同様な発振特性を示している。発振周波数は素子によって多少異なるが、熱拡散法で製作した素子は現段階では最高 8.05 GHz の発振が得られている。

4.2 InAsのpn接合固体プラズマ素子の諸特性

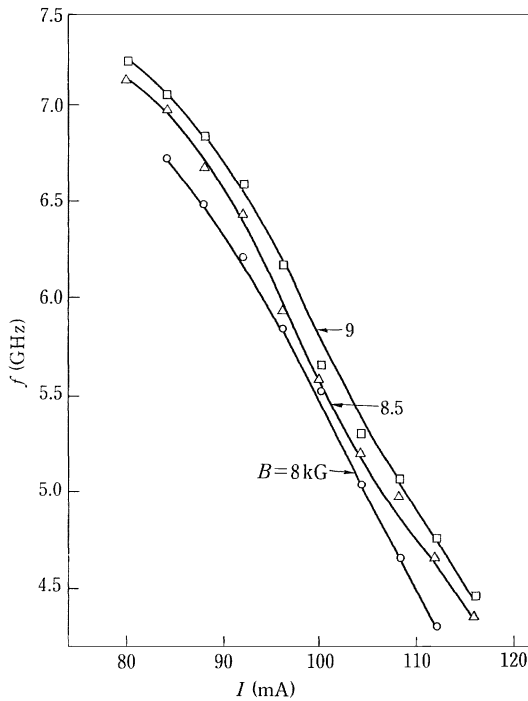
図5に液相成長法で製作した代表的なInAsのpn接合素子の常温における逆バイアスを印加した場合のV-I特性を示す。外部磁界Bは素子電流方向に対して垂直に印加されている。 $B=0$ の場合は電圧が約 -4.3 V でブレイクダウンを生じている。液体窒素温度(77 K)ではブレイクダウンを生じる電圧は約 -1.2 V であり、常温の場合と比べてその電圧の絶対値は小さい。外部磁界を増加するとブレイクダウンを生じる電圧の絶対値が増加する傾向がある。この傾向はInSbのpn接合素子の



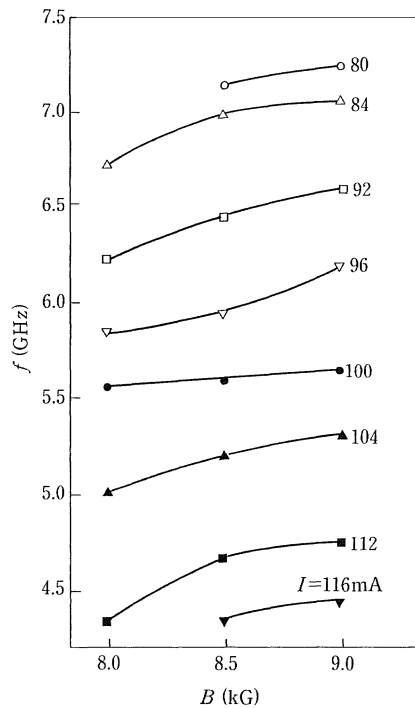
(a) 領域 I における発振周波数の電流依存性



(b) 領域 I における発振周波数の磁界依存性



(c) 領域 II における発振周波数の電流依存性



(d) 領域 II における発振周波数の磁界依存性

図 4 発振周波数特性

場合と同様である。図 6 に上記の素子の発振周波数特性を示す。図 6 (a) は発振周波数の電流依存性、図 6 (b) は発振周波数の磁界依存性である。発振はブレイクダウン状態で InSb の pn 接合素子の場合と同様に横磁界を 6kG

以上印加すると生じる。また縦磁界では発振が観測されない。発振周波数は素子電流を増加すると減少し、また外部磁界を増加すると増加する。この傾向は InSb の pn 接合素子の領域 II における発振特性と同様である。発振

周波数は素子電流および外部磁界を変化させることにより 1.2 GHz ~ 3.3 GHz の範囲で変化する。液体窒素温度 (77 K) では 0.5 GHz ~ 3.4 GHz の範囲で周波数が変化している。現段階では上で述べた素子とほぼ同一な特性を示す素子で、常温で周波数が最高 3.5 GHz の発振が得られている。InAs の pn 接合素子の発振周波数は InSb の pn 接合素子のそれと比べると低い。

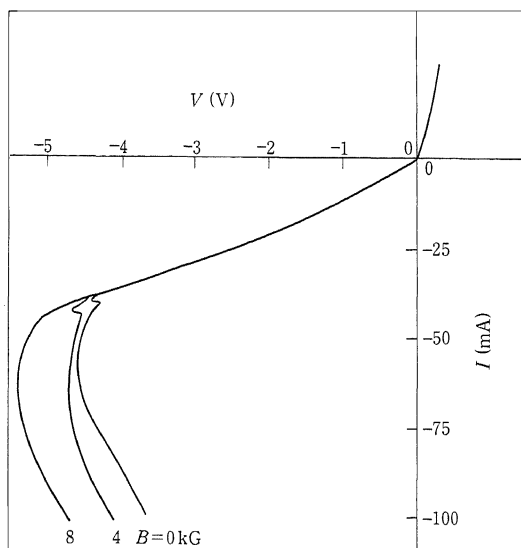
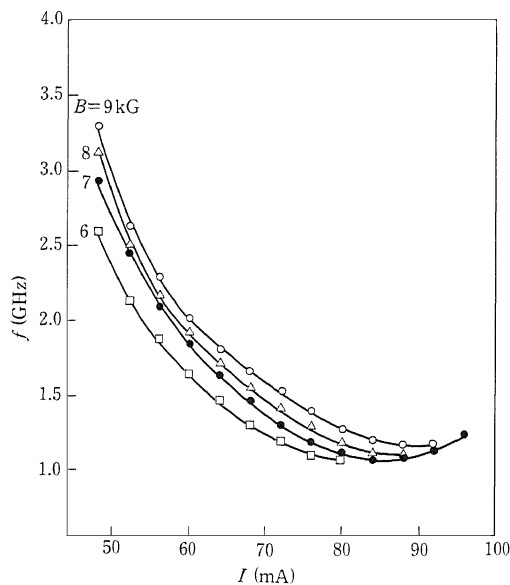


図5 逆バイアスを印加した場合の電圧電流特性



(a) 発振周波数の電流依存性

InSb および InAs の pn 接合固体プラズマ素子におけるコヒーレントなマイクロ波発振の周波数スペクトルはほぼ同一の特性を示している。図7に InAs の pn 接合固体プラズマ素子の常温における典型的な周波数スペクトルを示す。発振は非常に帯域が狭くコヒーレントである。

5. 検 討

InSb および InAs の pn 接合固体プラズマ素子の諸特性を実験的に明らかにした。その結果これらの素子においてマイクロ波を発振させるための主な条件は次の2点

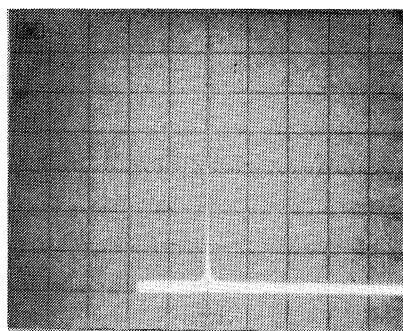
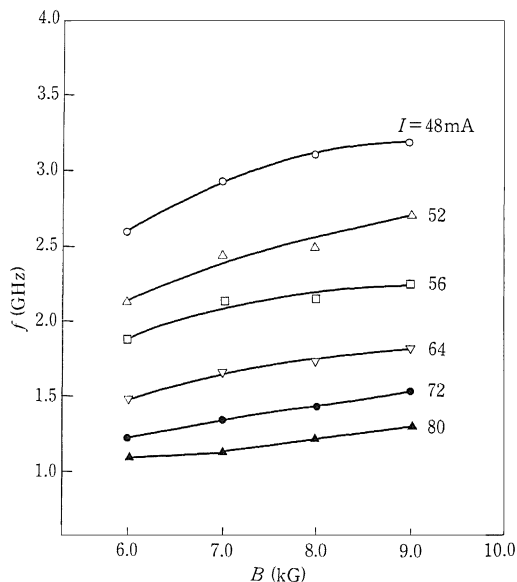


図7 InAs の pn 接合固体プラズマ素子の 周波数スペクトル
発振周波数 $f=2.05$ GHz, 素子電流 $I=58$ mA, 外部磁界 $B=8.75$ kG, 測定温度 300 K, 横軸 200 MHz/div, 縦軸 任意スケール



(b) 発振周波数の磁界依存性

図6 発振周波数特性

が掲げられる。

- (1) 固体プラズマ状態、即ち電子正孔プラズマが必要であること。
- (2) 素子電流と垂直方向の磁界（横磁界）が数 kG 以上必要であること。

発振周波数特性に関しては Musha ら¹⁰⁾および Tacano ら¹¹⁾の実験結果と類似している点もある。彼らは発振が helical instability¹³⁾に帰因していることを報告している。しかしながら helical instability の理論は縦磁界の場合であり、本実験では横磁界における発振現象であるので helical instability の理論では現象を説明し難いと思われる。横磁界における固体プラズマの発振に関する理論も報告されているが、そのほとんどが発振のしきい値について扱っており、発振周波数に対する詳細な解析は少ない。筆者¹⁶⁾は最近固体プラズマ中の縦波の不安定性に関する電算機解析を行ない数値解析により発振周波数を明らかにしている。上で示した発振条件、発振周波数範囲等は理論解析結果と定性的には一致するが、現段階ではまだ本実験の発振に関する機構は明確でない。

次に pn 接合固体プラズマ素子の工学的応用面について検討する。InSb の固体プラズマからのマイクロ波発振の最初の観測は、ガンダイオードおよびインパットダイオードにおけるそれとほぼ同時期である。その後これらのマイクロ波発振素子の研究は精力的に行なわれたが、InSb の固体プラズマでは発振がノイズ的であること、パルス動作であること、発振を生じさせるためには極低温（液体窒素温度）が必要もあることなどにより工学的応用面（例えば固体マイクロ波発振素子）が上記のダイオードに比べて著しく劣っていると思われる。しかしながら本論文で述べた pn 接合固体プラズマ素子は上記の欠点はほとんど解決している。特に InAs の pn 接合固体プラズマ素子は常温で発振が得られ、波形はコヒーレントであり、しかも DC 動作可能である。さらにガンダイオードおよびインパットダイオードでは実現できない特長がある。即ち発振周波数がマイクロ波領域において広範囲に可変できることである。現段階では InAs の pn 接合固体プラズマ素子は常温で発振周波数が 1.2 GHz ~ 3.3 GHz の範囲で変化可能であるが、将来研究改良を重さねていくことにより、数 10 GHz のマイクロ波、ミリ波領域で発振を生じ、しかも任意の周波数を選択できる素子が実現される可能性があると思われる。このような pn 接合固体プラズマ素子が実現されれば、固体マイクロ波、ミリ波発振器および固体高周波スイープジェネレータ等の工学的応用面に有効であると考えられる。

6. む す び

InSb および InAs の pn 接合固体プラズマ素子の製作および諸特性について述べ、それらの素子におけるマイクロ波発振に関して実験的に明らかにし検討を行なった。また特に InAs の pn 接合固体プラズマ素子は工学的応用面にも有効であることを示した。結果を要約すると以下ようになる。

- (1) マイクロ波発振は InSb または InAs の pn 接合素子に逆バイアスを印加しブレイクダウン領域の固体プラズマ状態で横磁界を数 kG 以上印加すると生じる。
- (2) 発振はコヒーレントであり、発振周波数は素子電流および外部磁界を変化することによりマイクロ波領域で広範囲に変化する。
- (3) 発振周波数は InSb の pn 接合固体プラズマ素子では 77 K において最高 8.05 GHz, InAs の pn 接合固体プラズマ素子では常温において最高 3.5 GHz が得られている。

本論文で述べた pn 接合固体プラズマ素子は現段階においては発振周波数が数 GHz 程度であるが、今後さらに研究改良を進めていくことによりマイクロ波、ミリ波領域で広範囲に発振する素子が実現される可能性があると思われる。

（原稿受付 昭和 57 年 9 月 24 日）

文 献

- 1) R. D. Larrabee and W. A. Hicinbotham: Proc. 7th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors (Dunod, Paris) 181 (1965).
- 2) K. Suzuki: Jap. J. Appl. Phys. **4**, 42 (1965).
- 3) B. Ancker-Johnson: J. Appl. Phys. **39**, 3365 (1968).
- 4) G. A. Swartz and B. B. Robinson: J. Appl. Phys. **40**, 4598 (1969).
- 5) K. Kamakura: J. Magnetism and Magnetic Materials **11**, 390 (1979).
- 6) S. J. Buchsbaum, A. G. Chynoweth and W. L. Feldman: Appl. Phys. Letters **6**, 67 (1965).
- 7) A. G. Chynoweth, S. J. Buchsbaum and W. L. Feldman: J. Appl. Phys. **37**, 2992 (1965).
- 8) J. C. Eidson and G. S. Kino: Appl. Phys. Letters **8**, 183 (1966).
- 9) T. Musha, F. Lindvall and J. Häggglund: Appl. Phys. Letters **8**, 157 (1966).
- 10) T. Musha, J. Ohnishi and M. Hirakawa: Phys. Rev. Letters **22**, 1254 (1969).
- 11) M. Tacano and S. Kataoka: J. Appl. Phys. **42**, 4006 (1971).

- 12) D. K. Ferry and A. A. Dougal: Appl. Phys. Letters **7**, 318 (1965). 稿集 502 (1980)
- 13) M. Glicksman: Phys. Rev. **124**, 1655 (1961). 15) 鎌倉他：第28回応用物理学関係連合講演会予稿集571 (1981)
- 14) 鎌倉他：第27回応用物理学関係連合講演会予 16) 鎌倉：国士館大学工学部紀要 **14**, 35 (1981)