
超 高 周 波 技 術 特 集

超高周波固体素子とその応用.....	49
GaAs のエピタキシャル成長	53
GaAs ミリ波ダイオードと回路	59
ガン発振器を用いたテレビジョン中継装置.....	66
液体ヘリウム冷却パラメトリック増幅装置.....	74

超 高 周 波 固 体 素 子 と そ の 応 用

High Frequency Solid-state Devices and Their Applications

関 口 存 哉*
Ikuya Sekiguchi

要 旨

最近活発に研究開発の進んでいる超高周波固体素子について、その種類、技術の現状と問題点を概観し、さらにこれらの固体素子の通信機器その他への応用面と応用の意義、および応用に際し考慮すべき事項について述べる。

1. 緒 言

トランジスタ、ダイオードなどの技術の進歩によって 1 GHz 以上 10 GHz までの高周波通信機器が全固体電子化されるようになってきている。最近ではさらにこれらの素子の改善に加えて Gunn 素子、IMPATT 素子など新しい固体素子が開発され、それらの適用領域もミリ波通信機器に及ぶようになった。

機器の固体電子化によって小形化はもちろん、消費電力の低減、高信頼度化、保守の簡易化、これらを総合した経済性など多くの利点を得られる。

本文では最近の超高周波固体素子の種類と技術の現状を概観し、応用面の今後の見通しについて展望することにした。

2. 固体電子化の動向

現在 10 GHz までの通信機器の固体電子化は主としてバラクタ周波数通倍方式によっている。低周波よりの周波数通倍による方式は周波数安定度の良い利点があるが、一方通倍段数が増すに従って回路構成が複雑となり、電力消費も増し、信頼度の点でも好ましくなくなる。このため、マイクロ波、ミリ波など直接発振する固体素子の出現が望まれていた。

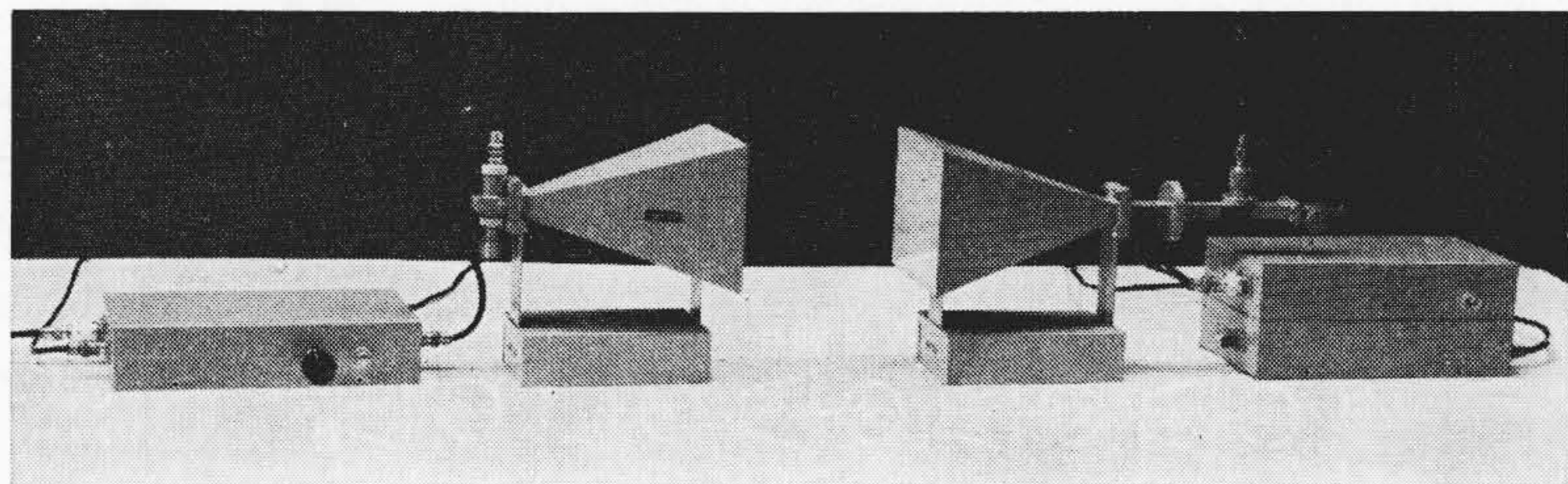
最近、Gunn 素子、IMPATT 素子などの発振素子が開発され、しかも発振電力、能率の点で従来の反射形クライストロンと比較して劣らぬものができるようになった。

これらの素子によって 10 GHz 以上の周波数帯での固体電子化が可能になり、経済的で信頼度の高い通信機器が提供されるようになると、従来比較的未開拓であった領域の利用が急速に進むことになる。現在 10 GHz までに電波がひしめきあっていることを考えると、このような技術の進展の貢献度はきわめて大きい。

今後通信の扱う情報量は増大する一方で、特にテレビ電話など画像通信の実用が始まる時期には 2 インチ径 1 本の導波管で、10 GHz もの広帯域の信号を伝送し得るミリ波通信方式は経済的見地からも不可欠のものとなるであろう。

また人工衛星による宇宙通信も、電波の干渉その他の点により、準ミリ波帯の使用を考慮するようになってきている。

半導体による固体素子では周波数が高くなるに従って素子が小さくなるために、主として熱放散の点から大出力を得ることに困難があるように思われる。特にレーダ用の出力管など、kW 程度の出力を要するものでは将来とも電子管が用いられることが予想される。しかし、最近では Phased Array Antenna と称して、平面上に同一周波数で励振された多数の高周波素子を並べ、その発射電波の位相を適当に調整し、空中線としての指向性を得る形のものがあらわれた。送受信素子と空中線が一体化されたものである。1 個の素子の出力



周 波 数 12 GHz
ビット周波数 100 MHz

図 1 Gunn 発振素子によるテレビジョン中継実験

が 1 W であっても 1,000 個ならべれば 1 kW となる。このように、固体素子で kW を出すことも可能である。いくつかの素子が故障を生じても全体として空中線の特性がわずかに劣化するにすぎない。graceful degradation といわれるゆえんである。

一方、最近電子計算機その他で急速に実用化されつつある集積回路 (I. C.) の技術がマイクロ波に応用されつつある。いわゆる、マイクロ波 IC と呼ばれるものである。1 枚のシリコンチップの上で増幅器が組まれる形のものもあるが、多くは薄膜回路を並用したハイブリッド形である。これで 4,000 MHz のトランジスタ増幅器が試作されるようになってきている。

また Gunn 発振器の原理が論理回路へと応用されることも考えられるなど、超高周波素子より IC へのフィードバックもあり得るわけである。

日立製作所においては約 6 年前からミリ波、マイクロ波用のダイオードを試作し商品化するとともに、放送局用テレビ中継機などマイクロ波機器の固体電子化を行なってきた。また前に述べたような新しい超高周波素子の時代に即応し、GaAs 結晶技術、GaAs の各種ダイオードの開発にも力を入れている。

昭和 40 年より 2 年半、日本電信電話公社電気通信研究所と日立製作所との間で GaAs ミリ波ダイオードに関する共同研究が行なわれた。この研究によって従来困難とされていた GaAs 結晶の制御が比較的容易となり、試作されたダイオードは日本電信電話公社のミリ波通信実験に用いられて好結果を得ている⁽¹⁾。一方 Gunn ダイオードに関しては数年前よりエピタキシャル結晶による試作を行ない、昭和 42 年にはこれを用いて、10 GHz 帯において 100 MHz Bit の 4 変調によるテレビジョン信号の伝送実験に成功している⁽²⁾。

また、Gunn ダイオードの実用のために雑音、温度特性試験と安定化、バラクタによる変調、引込み発振、寿命試験など多くの開発的研究を行ない、本ダイオードが従来の反射形クライストロンに代わってじゅうぶん実用に供し得ることを確認した。またテレビジョン中継などの機器への実用も進めている⁽³⁾。

前述の日本電信電話公社におけるミリ波通信実験を見ても中継器が固体電子化され、真空管としては電源の表示用豆ランプ以外はい

* 日立製作所中央研究所 工学博士

表 1 超高周波素子用として使用される材料の主要性質

材 料	禁 制 帯 幅 300°K (e V)	電 子 移 動 度 300°K cm ² /V・s	正 孔 移 動 度 300°K cm ² /V・s	熱 伝 導 度 300°K cal/cm・s℃
Ge	0.67	2,100	800	0.14
Si	1.11	520	240	0.34
Ga As	1.40	5,300	350	0.10

注：電荷移動度は不純物濃度 10¹⁷/cm³ の場合の値

っさいない。まさに 5～6 年前には技術者の夢であったことが実現されているのである。

このような新しい通信の時代の夜明けに際し、以下「超高周波技術特集」として日立製作所において開発中の超高周波素子と、その応用に関し報告するが、ここではまず超高周波素子の現状と応用の問題に関して概説することとしたい。

3. 超高周波素子用の材料

超高周波素子用の半導体材料として現在主として用いられるものは Ge, Si, GaAs (ガリウムヒ素化合物) である。表 1 はこれら材料の主要特性を比較したものである。

この表において、まず禁制帯幅 (energy band gap) が、Ge, Si, GaAs の順に大きくなり、この値が大であるほど高温で利用できる。これらの材料でトランジスタを作った場合の最高動作温度は Ge で 100°C, Si で 200°C, GaAs で 300°C となる。高電力で使用する場合、素子自体の温度が周囲温度よりかなり高くなるのが普通であるから、禁制帯幅の大なることはそれだけ有利である。

次に電子、正孔の電荷の移動度 (mobility) であるが、これは電界を与えた場合の電荷の速度を示すもので、超高周波素子の性能に直接的に寄与する重要な量である。この値は Si, Ge, GaAs の順で大となる。特に GaAs の移動度がきわめて高いことが注目される。

高電力素子の場合、微少な素子に大電力が集中するため放熱が問題となる。したがって素子内の熱伝導度は重要な因子である。この点では Si が最もよく、GaAs は劣っている。

超高周波素子用の材料としての良さは、これらの諸定数以外の多くの因子が関係するので、各素子ごとに検討される必要がある。

このほか、GaAs にはバルクで負性抵抗を生ずるという現象がある。後述の Gunn 素子, LSA 素子などはこの原理によるものである。

次に材料の生成, 加工という面から見ると Ge, Si に関する技術が進んでおり GaAs などの金属間化合物に関しては不明のことが多い。後者は結晶として純度の高いものを得ることがむずかしいため不純物濃度の制御自体が困難である。したがって GaAs 素子の今後の発展いかんは結晶の生成, 加工技術の進歩にかかっているといっても過言ではない。

4. 超高周波固体素子の種類

4.1 バイポーラトランジスタ

始めに Ge と Si の比較をしよう。表 1 に見られるように電荷の移動度の点では Ge のほうが有利である。特に電子移動度の大であることから Ge の PNP トランジスタはベース広がり抵抗を低くすることができるので超高周波用として適している。しかし、一方においてシリコンのほうが高温での特性が良いこと、熱伝導度が高いこと、高電界での移動度の飽和値が高いこと、加工技術が進んでいることなどの理由で有利な面もある。

これらを総合して見ると Ge と Si との差は少なく、いずれも実用的な意味での高周波限界は遮断周波数 f_t の値で 3～4 GHz また f_t の理論的限界は 10 GHz 程度である。 f_T が 7 GHz のトランジスタでベース領域の厚みが 0.3 μ , シリコンの原子が数百個配列した程度とな

ることからも、構造的限界がこのへんにあることがわかる。

GaAs は電子移動度が大であることから、原理的にはトランジスタ用として有望である。しかし、純度のよい結晶が得られないことと、不純物の高濃度拡散が困難なことから、トランジスタ設計上必要な濃度分布が得られず結晶の欠陥が多いため超高周波用のものは開発されていない。現在 GaAs で作られたトランジスタの例は最高 500 MHz 程度である。しかし GaAs トランジスタが、4.2°K より 500°C まではほとんど特性に変化なく動作するという例もあり⁽⁴⁾、将来とも注目すべき余地が残っている。

4.2 FET

FET (Field Effect Transistor) の場合にはかなり事情が違ってくる。FET ではバイポーラトランジスタの場合と異なって不純物分布の制限があまり問題にならず、また Majority Carrier によって増幅が行なわれるので欠陥などの影響の受けかたも少ない。したがって Ge, Si よりも GaAs のほうが電荷移動度が大きいただけ有利となる。GaAs による FET の性能としては 10 GHz 以上で増幅度を有するものができることが予想されている。

4.3 バラクタ素子

一般の半導体素子は逆バイアスをかけた状態で純粋な容量となる。しかも容量の値はバイアス電圧によって変化するので非直線特性を呈する。この非直線を利用して周波数逡倍とか、周波数変換またはパラメトリック増幅を行なわせることができる。

実際には容量分に対し直列に抵抗があるので、この値が超高周波での最高使用限界を左右することになる。直列抵抗 R と動作中心における容量値 C_0 のリアクタンス分が等しくなる周波数がほぼこの限界に相当するものと見てよい。この周波数 f_c を遮断周波数とい

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_0 R} \dots\dots\dots (1)$$

超高周波のバラクタ素子として現用されているものの多くは Si 拡散ダイオードである。 f_c としては 100～200 GHz 程度のものが市販されている。

これより高い f_c を得るには GaAs を材料とする拡散, ボンド, ポイントコンタクトあるいはショットキーダイオードなどが有利となる。 f_c として 300～500 GHz のものが得られている。特に GaAs 拡散ダイオードは少数キャリア蓄積効果の影響で能率が向上する。後続論文にあるように ECL-2172 により 4 逡倍で 47 GHz の出力 25 mW, 逡倍能率 25% のものも開発されている⁽⁵⁾。

低雑音パラメトリック増幅器用としても GaAs 素子はすぐれている。Si, Ge と異なり、GaAs の電荷移動度は超低温度でむしろ大きくなる傾向にある。しかし GaAs の熱伝導度が比較的到低いことから、素子の温度上昇が大となり、このため雑音が増加する場合のあることを考慮する必要がある。

4.4 受信用ミキサ・ダイオード

ヘテロダイン受信用のミキサ・ダイオードも漸次改良されつつある。ヘテロダイン受信機の雑音指数 F は次式で表わされる。

$$F=L(F_{if}+t-1)$$

ここで、 L ：ミキサ・ダイオードの変換損失

F_{if} ：中間周波増幅器の雑音指数

t ：ミキサ・ダイオードの雑音温度

したがってダイオードの雑音特性は変換損失 L , 雑音温度 t によって決まる。

ミキサ用ダイオードとしては GaAs ダイオードが最もすぐれている。試作されたものの特性例としては後続論文にあるように GaAs ボンド形 ECL-2171 で 50 GHz において $L=6\sim7$ dB, $t<1.2$ のものが得られている。また Bell 研究所のミリ波中継器実験に使用され

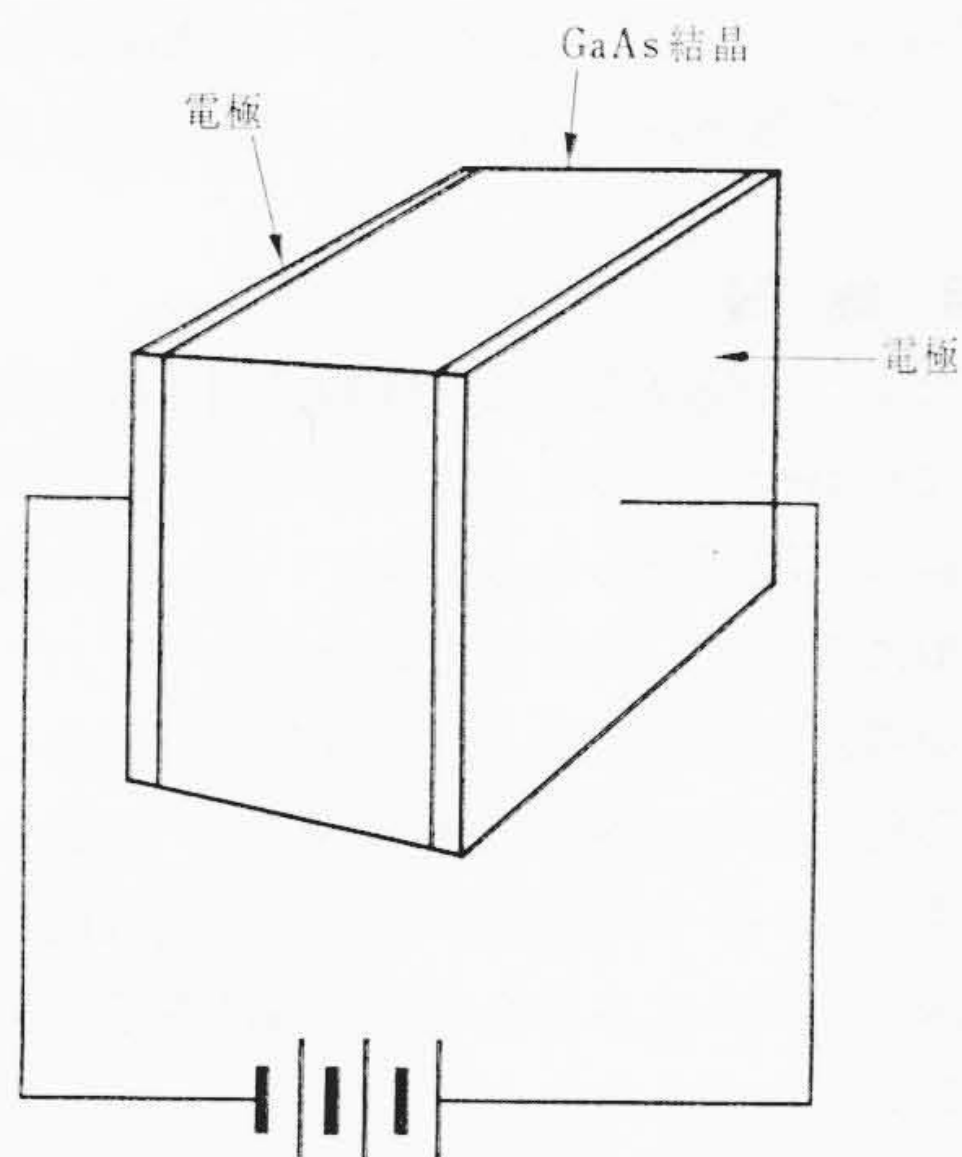


図2 Gunn 発振素子

た例でショットキーダイオードで 50 GHz, $L=6\pm0.5$ dB, $t\approx1$ のものが発表されている。

この程度のダイオードを用いると、中間周波増幅器の雑音数を 5 dB 程度と仮定して、50 GHz の周波数帯で総合雑音数 11~12 dB を得ることができる。

4.5 IMPATT 素子

市販の高周波用ダイオードに逆バイアスを加え、なだれ現象により電流が流れる程度の電圧にすると、ダイオード周辺の回路条件によっては発振することがある。ダイオードの材料は Ge, Si, GaAs いずれでも良い。この状態でダイオードは負性抵抗となり、周辺の回路条件によって決まる周波数で発振する。しかしなだれ効果を利用するものだけに雑音が比較的大きい。

このような効果を利用するダイオードを総括して IMPATT (Impact Avalanche and Transit Time Device) と称する。Bell の De Loach 氏が超高周波帯での発振に成功し、Bell の三沢氏が理論を確立した。その後の開発によって雑音も初期に予想された値より少なく、また出力の大なるものが現われている。

Si の IMPATT は比較的能率が良く、Bell 研究所の例では 14 GHz で能率 9~10%, 出力 4.7 W, また 70 GHz で能率 3%, 出力 130 mW が得られており、半導体素子中では最も出力が大きい。電力が大なるだけに、素子よりの放熱には特別のくふうが必要である。材料としては主として Si が用いられているが Ge, GaAs を用いたものもある。

4.6 Gunn 発振ダイオード

Gunn ダイオードは一部の金属間化合物に特有の現象を利用するもので、現在主として GaAs を材料とするものが開発されている。

GaAs のように III-V 属化合物では電子の存在する伝導帯が 2 種類あり、その一つでは電子の移動度が高く、ほかでは低い。結晶の電界が高くなるに従って電子は移動度の高い伝導帯より低いほうに遷移する現象がある。図 2 に示すようにバルクの結晶の両端に電圧をかけた場合を考えよう。電圧によって結晶内を電子が走ることによって電流の流れが生ずる。結晶の一部に上記の臨界電界よりも高い電界が生じたものと仮定すると、その部分の電子の速度は減じ、このためその後方に電子の密度の高いところ、前方に電子の密度の低いところができる。電子密度の高い所は負に、電子の密度の低いところは格子の電荷で正になりこの電気二重層によってこの電界はさらに高くなる。しかもこのような高電界の層 (high field domain という) が電極間を走るようになる。

実際にはこのような domain が一方の電極(負電極)に接した部分において生じ、走行後、他の電極(正電極)に到達して消滅する。この消滅の周期に応じた周波数で高周波が発振する。

表2 反射形クライストロン, Gunn 発振素子, IMPATT 素子の電源仕様の比較

		電 圧 (V)	電 流 (mA)	出 力 (mW)	効 率 (%)	周波数 (GHz)
反射形クライストロン	陽 極	400	40	50	0.3	13
	リベラー	200	0			
	ヒータ	6.3	600			
Gunn 発振素子		6~8	300~400	50	1.5~4	13
IMPATT 素子		80	20	50	3	11.6

注：反射形クライストロンの場合効率は通常陽極入力に対する高周波出力の比で表わされる。したがってリベラーの電源側の消費電力、ヒータ電力を考慮に入れると総合効率はさらに低下する。

Gunn 効果は 1963 年に IBM の J. B. Gunn 氏によって発見され、その後多くの人によって理論づけられている。

Gunn 素子の発振周波数は電極間の距離、すなわち結晶の厚みが小なるほど高い。したがって低周波用の素子では結晶の厚みが大となって熱放散がむずかしくなり大電力が得られない。一方超高周波では回路との整合をとる必要上、素子抵抗をある一定値にするため面積を少なくする結果、入力電力が減り出力を得ることがむずかしくなる。現状で最大の出力が得られるのは 10 GHz 程度 (結晶厚み 10μ) である。得られている電力の例としては 10 GHz で 150 mW 程度である。

4.7 LSA

GaAs バルク結晶はそれ自体負性抵抗を有している。したがって Gunn 発振を回路条件により抑制すれば純粋な負性抵抗素子として動作し、Gunn 素子よりも高周波で大出力が得られる。Bell 研究所と電気試験所においてそれぞれ異なる方法で研究が進められている。

4.8 その他の素子

GaAs 中の domain の進行を利用して超高周波の進行波増幅を行なう試みがある。Stanford 大学では周波数 500~1,500 MHz で 2~3 dB の利得を得ている。日本電信電話公社電気通信研究所では 1.5 GHz で 12 dB の利得と 2 mW の出力が得られている。

5. 超高周波固体素子の応用

5.1 発 振

マイクロ波よりミリ波の 50 GHz 程度まで、従来の小出力 (最高数 W 程度) または局部発振用として反射形クライストロンの代わりに用い得る素子が開発されている。

表 2 は市販反射形クライストロンとガン発振器, IMPATT との電源電圧, 能率の比較の一例である。特にガン発振器は電圧が低くてよいので、電源回路が簡単で良く、機器全体の小形化の点で好ましい。

雑音は反射形クライストロンが最も少ないが、すでに Gunn 素子, IMPATT でも実用に耐える程度のものが得られるようになっている。

IMPATT は降伏電圧と降伏電流によってきまるが、ある周波数範囲内で発振周波数は回路条件によって決まる。Gunn 素子は結晶の厚みによって発振周波数が異なるが、ある程度回路条件で変えることもできる。たとえば 10 GHz において ± 2 GHz 程度変えることができる。

半導体特有の問題として発振周波数の温度特性は比較的大である。しかし後続論文のように回路による補償によってクライストロンと同程度または以下の温度係数にすることが可能である。

半導体であるために寿命は電子管より長いことが予想されている。日立製作所における信頼度試験では少数例ではあるが 7,000 時間の寿命試験で特性変化がないという結果が得られている⁽⁸⁾。しか

し、金属間化合物ではトンネルダイオードのように高不純物濃度、薄接合の場合に経時変化が問題となった例もあるので、今後多数のデータが積み重ねられる必要がある。

一般に半導体固体素子では破壊電圧が比較的到低く、マージンが少ない状態で使用せざるを得ない場合が多い。このため電源回路などよりの衝撃パルスなどにより破壊する可能性が多いので対策が必要である。これはツェナーダイオードなどによって防止することができる。

5.2 変調

(1) 振幅変調

半導体の場合、パルスによる ON-OFF の変調は比較的容易である。変調器に対する負荷のリアクタンスが小さいので変調器の負担は軽減される。しかし、直線性のよい振幅変調は比較的困難である。また周波数変調を伴いやすい。

このほか、素子の負性抵抗によって外部回路によって低周波の発振を生じやすいことに注意する必要がある。

(2) 周波数変調

広帯域変調を行なうには発振素子にバラクタなど可変容量素子を並列に組み合わせて容量変化によって周波数変調するのが最も良いと思われる。Gunn 素子の場合、13 GHz で ± 100 MHz 程度、変調感度 34 MHz/V が得られている。副搬送波によって変調を行なう場合の直線性は ± 10 MHz で、微分利得偏差 3% 程度である。この点反射形クライストロンと比較して見おとりなく、変調器はむしろはるかに簡単なものですむようになる。

5.3 周波数逡倍、変換

従来マイクロ波で得られている程度の特徴が、最近バラクタの進歩によってミリ波の中域程度まで得られるようになってきている。しかし、ミリ波の領域ではダイオードケースの浮遊容量、マウントとの接触などの付随的問題がクローズアップされる。したがってケースの小形化、マウント構造などのくふうが必要となる。ケースとしては、プロング形、その小形化したものなどまたは導波管形、Sharpless 形などのものが用いられるようになってきている。

5.4 増幅

小信号電力の増幅用としては従来トンネルダイオードが用いられており、またその他の負性抵抗素子も増幅に用いる試みがされている。しかし送信用進行波管に相当するような電力増幅に適した素子がない点が問題となることがある。特にヘテロダイン中継方式のように、送信側での周波数変換後の高周波出力が局部発振器の出力より低下するものでは電力増幅が必要となる。

最近発振素子を被変調波によって引込み発振させること、つま

り Lock-in 増幅器の研究が行なわれている。Lock-in の程度、振幅変調度など多くの問題があるが、今後の進展を期待される方式の一つである。

5.5 応用機器

以上に述べたように超高周波通信機器の固体電子化に必要な超高周波素子がかかなり出そろってきた感がある。小出力のマイクロ波、ミリ波通信機器は実現可能となってきた。また低雑音増幅、空中線技術の進歩によって、送信出力も比較的小電力ですむようになっている点を特に指摘したい。直流電源電圧が著しく低いための電源装置の小形化も含め機器の全体の小形化、低電力化によって、電源を電池にするとか、太陽電池にして局を無人化し、素子の長寿命と合わせて保守の簡易化される点の利益は電子管を使用する場合と比較して著しいものがある。

レーダなどの高出力のものは当分電子管を用いざるを得ないように思われる。しかし、前に述べたようにマイクロ波帯で Phased Array Antenna で kW の出力を得るものも出現していることを見ると、レーダへの応用も近いことが予想される。

このほか、装置の小形化により小出力のレーダ、近距離の物体移動の検知に用いるドップラーレーダ、測距、寸法の精密測定制御などへの応用も開拓される可能性がある。

6. 結 言

最近著しく進歩をとげつつある超高周波素子の現状と、応用面および問題点について概説した。日立製作所において開発中の技術の詳細については後続の論文を参照されたい。

ミリ波ダイオードの開発は本文に記したように日本電信電話公社電気通信研究所と日立製作所との共同研究によって行なわれたが、本共同研究を推進された日本電信電話公社電気通信研究所三輪企画調査室長、神谷部長、また研究会を主宰された歴代の半導体部品研究室長橋本氏、鶴瀨氏、今井氏、および研究室各位のご指導に深く感謝する。

また Gunn 素子の開発にあたっては日本放送協会技術本部のかたがたに应用の機会を与えられたことを厚くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 昭和43年10月日本電信電話公社電気通信研究所ミリ波シンポジウム
- (2) 変調 TV 伝送大会予稿
- (3) 日笠ほか3名：日立評論 50, 1038 (昭43-11)
- (4) Hans Strack: Electronics 40, 119 (Nov. 13, 1967)
- (5) 石井ほか3名：日立評論 50, 1031 (昭43-11)