



Title	マイクロ波帯より光波帯にいたる電磁波発生および増幅装置の最近の動向
Author(s)	桜庭, 一郎; Sakuraba, Ichiro
Citation	北海道大學工學部研究報告, 39, 65-75
Issue Date	1965-12-14
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40779
Type	departmental bulletin paper
File Information	39_65-76.pdf



マイクロ波帯より光波帯にいたる電磁波発生 および増幅装置の最近の動向

桜庭 一郎*

(昭和40年8月31日受理)

Recent Trends of Electromagnetic Wave Generators and Amplifiers for Microwave through Optical Frequencies

Ichiro SAKURABA

(Received August 31, 1965)

Abstract

This paper presents the recent trends of electromagnetic wave generators and amplifiers for microwave through optical frequencies.

Electron-beam devices are now used extensively in electronic systems from 0.1 gigacycle to approximately 100 gigacycles. Because of power-dissipation and current-density limitations, conventional electron-beam devices appear to be restricted to ranges below 1000 gigacycles. Bunched high-density electron-beams appear to be prospective for sub-millimeter and infrared regions.

Now, solid-state devices are available at substantial powers in the low end of the microwave region. More recently, these devices have been operated well into the millimeter-wave region, thus representing a significant challenge to the electron-beam device. Recent research on solid-state bulk semiconductor devices has given substantial power in the microwave region and holds some promise for operation in the infrared region. Junction devices have been operated in the optical region of the spectrum. The phonon traveling-wave amplification as an electrical amplifier is not at present very competitive, but there is good hope with the development of new transducers and improved materials.

There will be rapid advances in photodemodulation techniques. Microwave electron-beam devices and PIN photodiodes are the leading contenders.

目 次

abstract	65
1. 緒 言	66
2. 電子ビーム装置	67
3. 固体電子装置	70
4. 結 言	73
参 考 文 献	74

* 電子工学科電子管工学講座

1. 緒 言

1940年代の初期に開発され、その後大いに発展した crossed field 型や直線状の電子ビームを用いる発振器と増幅器は、0.1 Gc より 100 Gc に至る周波数帯の電子機器に広く使用されている。現在これらの power level は、連続出力でミリワットよりキロワット、また尖頭出力でメガワットにも及んでいる。

他方 10 数年おくれて出発した固体電子装置も、既にマイクロ波帯、ミリ波帯さらに光波帯にまで発展しており、とくに最近では thin film, PN junction および bulk semiconductor などが非常に注目されている。

これら両装置の出力と周波数の関係について、光波帯まで考慮した Herold の chart¹⁾ を求めると Fig. 1 となる。この図の曲線 C より上の部分では電子ビーム装置が使用され、曲線 A より下の部分では固体電子装置が用いられている。曲線 A と B の間の領域では、漸次固体電子装置が優勢となりつつあるが、この装置に全面的に置換されるまでには、かなりの時間を要するものと思われる。つぎに曲線 B と C の間の領域はここ数年来 transistors と varactor multipliers の発展が著しい。それ故この chart からつぎのようなことが予想し得る。第一にマイクロ波帯小出力信号用としては固体電子装置が主用せられ、第二に、より高い周波数帯と

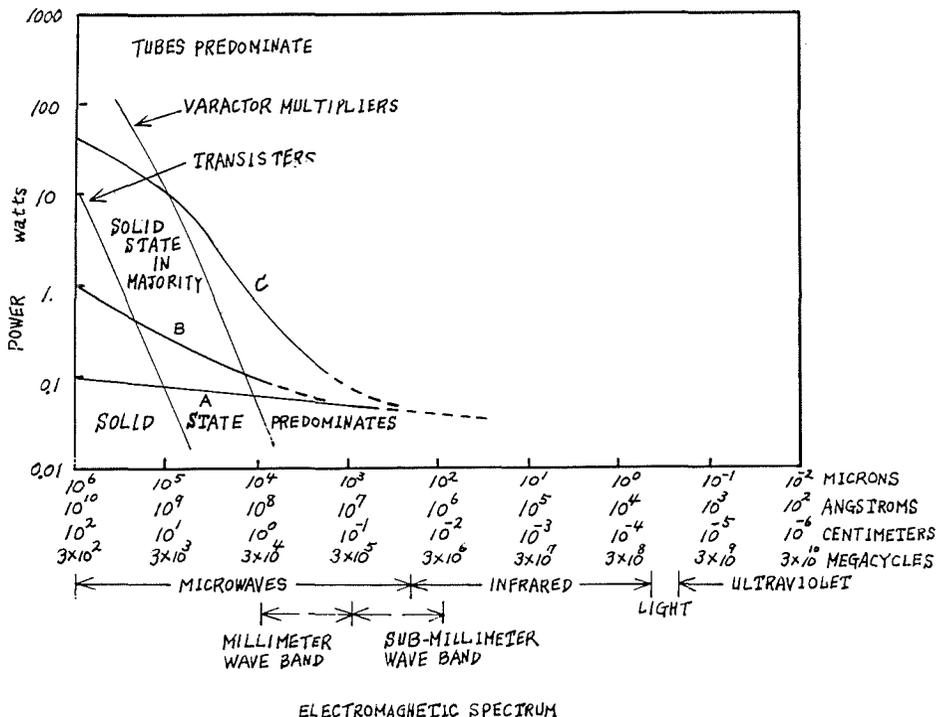


Fig. 1. Chart of average power vs. frequency for generator-amplifier devices.

より高い出力を要する分野では、電子ビーム装置が利用され²⁾、さらに第三として、光波帯に至る帯域では、当分の間興味ある競争が続けられるであろうということである。

電子ビーム装置と固体電子装置の両者における周波数と power level の上限は、同じ基本的問題によって決定される³⁾。すなわちそれらは、high electrical conductivity (つまり high beam current density と high density drift currents) と電気回路系の high thermal conductivity の問題である。電子ビーム装置の場合、high beam current density と high power dissipation の能力は分離して考察し得るが、場合によっては真空容器をとうしての熱放散が困難な問題となる⁴⁾。固体電子装置の場合、真空容器に関する問題はないが、electrical conductivity と格子の thermal conductivity は互に独立でない。

それ故これら諸装置のマイクロ波帯より光波帯に至る最近の研究の動向をやや具体的に考察し、とくに使用する電気回路系の問題、電子ビーム装置における相互作用の機構、さらに半導体内における相互作用の機構について考えたい。もとより世界各地で行なわれている研究状況を詳細に述べることは、時間的にまた紙数の面からも甚だ困難のため、著者が1963年7月より約2カ年勤務した The University of Michigan の Electron Physics Laboratory の研究を中心とし、在米中出席した多くの会合のうちとくに印象的な 1963 Electron Devices Meeting (in Washington, D.C.), 1964 Conference on Electron Device Research (at Cornell University), 1964 and 1965 IEEE International Conventions (in New York) さらに Symposium on Microwave Applications of Semiconductors (in London, June-July 1965) について述べよう。

2. 電子ビーム装置

電子ビーム装置は使用する電子ビームによって、defined laminar flow 型と unorganized flow 型とにわけられる³⁾。前者の典型的な例が、クライストロン、進行波管および crossed field amplifiers であり、後者は相互作用域に電荷が充満している電子管で、マグネトロンやアンプリトロンがこれに相当する。高密度電子ビームを用いたこれらの装置は、一般に狭帯域であるが高い結合インピーダンスを有する回路系を使用するため、60~80% の非常に高い能率を示す。しかし波長の短縮に伴って高エネルギーの電子流がかなり回路系に捕えられるため、熱放散が大変困難な問題となる。多空洞型クライストロンや進行波管では、high thermal conductivity の材料を使用した空洞が真空容器を形成し、真空部分より大気への熱伝達に良い結果を得ており、螺旋型の広帯域進行波管では、熱伝達のため beryllium oxide を使用して約50倍の高出力を得ている³⁾。

熱放散の具体的な例として、波長 0.5 mm 連続出力 1~10 watts の発振用電子ビームを考えよう。このような条件下では、一般に電子ビーム径が 1/8 mm 程度となり、電流密度も 800 amps/cm² をこえるに至る。それ故当然ながら強力な磁界で集束する必要がありまた回路の断面積は 4×10^{-6} cm² 程度の大きさになるから、回路の部分的電力密度は 20~50 megawatts/cm²

となりおおかたの金属が融解するに至る。

ミリ波およびミリ波以下におけるこれらの諸問題の解決の有力な方法として一般に quasi-optic circuits と結合する電子ビームの非直線特性の利用がある。この方法は多くの研究者達によって試みられているが、基本的原理は 10~25 Gc 程度の周波数で電子ビームを強く密度変調せしめ、それを quasi-optic circuit と結合させて 10~30 次の高調波出力をとり出すことである。とくに高速度電子ビームを使用すると、軸方向の debunching を与える空間電荷効果が減少し、かつ大電流密度のとき self-focusing の磁界を増加するようになる。また集群に必要な電力を少なくするため、100 kV 以下の電子ビーム電圧で速度変調を与えた後、直流電圧を上げて行き 500~1000 kV 程度にしついで回路系と相互作用せしめ高調波出力を取出している。

このような装置の一例として、Konrad と Rowe⁹⁾ によって開発されつつある Cerenkov 放射を利用する高速度電子ビーム装置について述べよう。この装置の概要図を Fig. 2 に示す。電子銃は Pierce 型を用いて 100 kV の電子ビームを形成している。その特性を Table I に与えた。また buncher は traveling-wave resonator を使用しており、特性を Table II に掲げた。ついで 600 kV 以上の電子ビームが通過する coupler は、いわゆる quasi-optic coupler

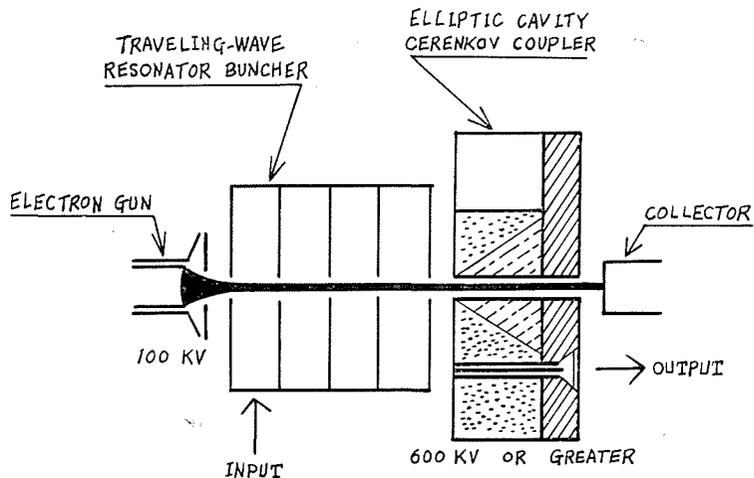


Fig. 2. A simplified schematic drawing of Konrad and Rowe's generator.

Table I. Electron Gun Characteristics of Konrad and Rowe's Generator

Current	$I_0 = 0.01$ ampere
Voltage	$V_0 = 100$ kilovolts
Density	$J_e = 0.5$ ampere/cm ²
Perveance	$\hat{P} = 3.2 \times 10^{-9}$
Beam diameter	= 1 mm or less

Table II. Buncher Characteristics of Konrad and Rowe's Generator

Bunching frequency	= 7.68 Gc
Measured impedance	= 35 ohms on axis
R_{shunt}/Q	= 1706
Bunching power	= 2 kW-cw

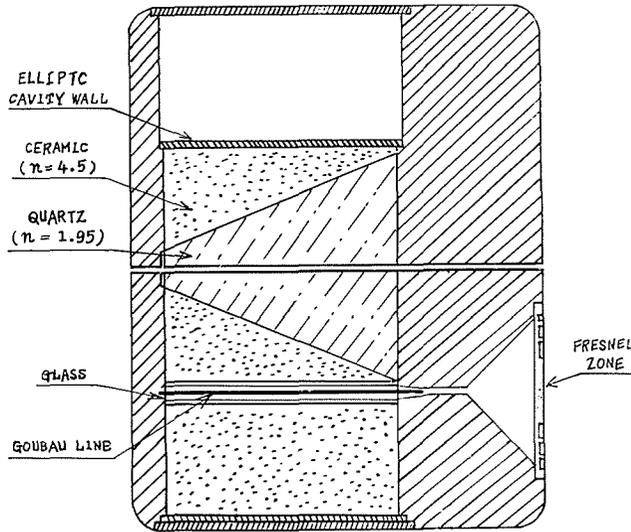


Fig. 3. Cross section of elliptic cavity coupler designed by Konrad and Rowe.

であり断面図を Fig. 3 に示した。これは elliptic cavity の一つの焦点に quartz cone coupler を置き、その周囲を refractive index $n = \sqrt{20}$ の ceramic でかこみ、他の焦点に radiation が集束するように構成されている。この焦点に置かれた出力回路は Goubau line であり、ついで同軸線に変換され、Fresnel zone lens を経て真空容器外に電磁波の出力を取り出している。理論的考察によれば、bunching frequency の第 20 次高調波成分がほぼ直流分に等しくなるよう bunching を与えることが出来、ビームの電力面積密度がほぼ 1 megawatts/cm² となる筈である。また高調波成分の電力体積密度は 100 megawatts/cm³ 程度となり、したがって 10 gigawatts/cm³ の高密度発生も可能と思われる。計算によると 150 Gc における理論的最小出力は 1/2 watt 以上である。

つぎにマイクロ波で変調された coherent 光を検波増幅する電子ビーム装置は、現在急速に発展しつつある。直線状の光電子ビームを用いた進行波管は、McMurtry^{6,7,8)} のグループおよび Blattner^{9,10)} のグループによって開発され、小信号理論も McMurtry や著者^{11,12)} らによって与えられている。また crossed field 系に多くの dynodes を配置した二次電子増倍管^{13,14)} も提案され、変調周波数 10 Gc 程度までの coherent 光を検波し得ると報告されている。一般に coherent 光を検波する装置のよさは $\eta^2 R_{eq}$ で与えられる。ここで η は光電面の量子効率であり、 R_{eq} は等価抵抗といわれ復調装置における相互作用の総合的な能率を示す。現在用いられている光電面は S-1 と S-20 であり、Table III にそれらの量子効率および responsivity を与えた。これらの値は photodiodes に比べて非常に小さく、したがって復調出力を大幅に増加するには、光電面の新しい発展を必要とする。他方等価抵抗は固体電子装置に比して非常に高い値を持つ。すなわち直線状光電子ビーム装置では、S 帯域で 10⁵ ohms 程度が容易に得られ、

Table III. Characteristics of Photocathodes

Photocathodes	Quantum Efficiency η	Responsivity ρ (amperes/watt)	Remarks
S-1	1.5×10^{-4}	1×10^{-4}	At a laser wavelength of 11500 Å
S-20	4×10^{-2}	1.3×10^{-2}	At a laser wavelength of 6943 Å

where $\rho = \eta e / h\nu$, η is the quantum efficiency, e is the charge of electron, h is the Planck's constant and ν is the frequency of the incoming light.

したがって $\eta^2 R_{eq}$ は 1~200 ohms となり、固体復調装置よりきわめて高い値を示す。

また遠心力を用いて静電界集束した光電子ビーム (CEF-photoelectron-beam systems, Fig. 4 参照) は、より高い等価抵抗を持ち^{15,16)} したがってより高い $\eta^2 R_{eq}$ を持つに至る。これらの比較の一例を Table IV に掲げた。さらに光電子ビームにおける種々の空間電荷波の利用によって、周波数変調をうけた coherent 光の復調も可能であり^{17,18)} 将来の発展が期待される。

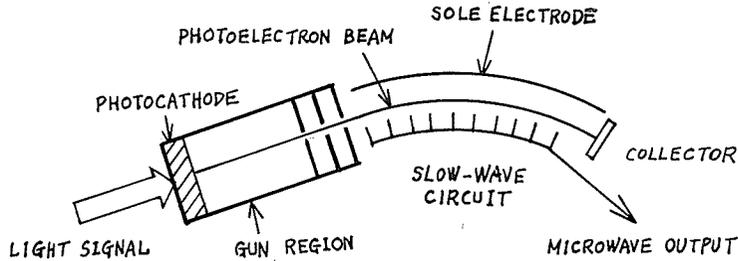


Fig. 4. A simplified schematic drawing of Sakuraba and Rowe's photodemodulator.

Table IV. Equivalent Resistances of CEF- and O-Type Photodemodulators

Types	R_{eq}/K	Remarks
CEF-type	$6.0 \times 10^5 (N=10)$	$C=0.004$ $\beta_e=40$ $b=d=\beta_q=0$
O-type	$0.99 \times 10^3 (N=10)$ $2.47 \times 10^4 (N=50)$	$C=0.004$ $b=d=Q=0$

where K is the interaction impedance, C is the gain parameter, β_e is the propagation constant of the photoelectron beam, b is the electron injection velocity parameter, d is the circuit loss parameter and β_q and Q are space-charge parameters.

3. 固体電子装置

前述したように固体電子装置は、電磁波スペクトラムの広い範囲で利用されており、ある分野では電子ビーム装置が solid state に全く置き換えられている。従来 thin film devices や

junction devices が注目されてきたが、最近では bulk phenomena が非常に発展しつつある。これらのうちで最も興味のある研究は、種々の半導体材料を使用した phonon traveling-wave amplifiers と phonon parametric amplifiers であろう。これらの研究で遭遇する諸問題は、電子ビーム装置におけるものかなり似ている。すなわち両者ともに high electrical conductivity (high drift current) と high-thermal-conductivity circuit element を使用しなければならないことである。一般に固体電子装置内の基本的な高周波回路は crystal lattice であり、そこを free carriers (drift current) が流れるため、内部に発生した熱を放散するには特別な方法を要する。それ故これらの研究分野において、electrical and thermal conductivities を同時に考慮することが必要であろう。この anisotropy の一例として遅波回路用の pyrolytic-graphite (P-G)¹⁹⁾ があげられよう。その電気的特性を Fig. 5 に示す。すなわち、ある面の electrical conductivity は殆んど金属と同じであるが、これに直角な面における

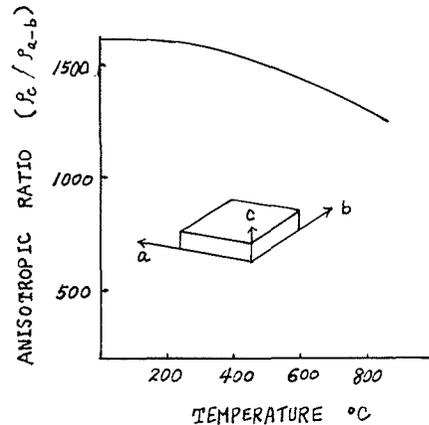


Fig. 5. Electrical properties of pyrolytic graphite; ρ_{a-b} is the resistivity in the a-b plane and ρ_c is the resistivity in the c-direction. (from Reference 6)

conductivity は三桁も低い値を持つ。現在 Karp line mode として使用した場合かなり損失が大であるが、thin film 技術や vapor-deposited materials の改良によって、ミリ波帯における遅波回路としてかなり有望であろう。

さてすべての固体電子装置にわたり手短かな展望を行なうことは、不可能であるから、free carrier-traveling-wave interactions を中心に述べ、とくにそれらの出力回路および結合の機構を考察しよう。

数年前直流電界を加えた piezoelectric cadmium sulfide において、phonon traveling-wave amplification が観測された。その材質内で、traveling acoustic wave の伝播方向に free carriers (electron) が drift し、もし drift velocity が sound velocity より大きければ、carriers より kinetic energy が wave に与えられ、進行波管と同様な指数的増大波を得るに至る^{20,21)}。現状では carrier diffusion のため使用周波数が 1 Gc 以下であるが、この様な interactions の周波数限界は 100 Gc 程度と考えられている²²⁾。低い周波数で良好な増幅作用を得るためには、transducer loss を 40 db 以下にし、かつ crystal の長さを適切にすることが必要であり、これらが解決すれば理論的利得 50 db/cm も実現可能と思われる。マイクロ波帯よりサブミリ波帯に至る領域においては、熱的に励振される lattice vibrations に基づく損失を減少せしめるため、低温装置 (おそらく 20°K 以下) を必要とするであろう。このことは前述した drift carriers と lattice の decoupling の問題に帰する。またこれらの波長領域の能率的な transducer は、

CdS の thin film を用いることによって開発可能である。CdS 内の compressional velocity はほぼ 10^9 cm/sec となり、 $1/4$ 波長の thin film の厚さは、10 Gc で 0.22 micron, 1000 Gc で 22 \AA となる。また空洞共振器型 transducer も非実用的となり、Fabry-Perot 共振器のような quasi-optical circuits の開発が待たれるであろう。固体電子装置にこのような回路系を使用することは、電子ビーム装置における回路系の問題と全く同様と思われる。

ついで興味ある junction devices の一つは、光波および infrared 帯で動作する solid-state injection laser である²³⁾。gallium arsenide は既に 0.6~1.5 microns 帯で動作しており、ごく最近では PbSe が 8.5 microns 帯でかなりの coherent な output を与えている。これらの laser は junction に対して電流密度 500 amps/cm^2 程度の injection を必要としている。それ故熱的問題のためパルス動作のみに限定されているが、前述した carriers と lattice の decoupling の問題が将来解決されるならば、より長い波長帯でかつ連続出力の得られる装置も実現可能と考える。

GaAs や InP における coherent なマイクロ波発振が J. B. Gunn²⁴⁾ によって観測されて以来、bulk semiconductor の研究が活発になされている。この装置は ohmic contact した n-type GaAs で数 kV/cm の強電界下におかれ、電流の injection によって不安定を生じ、ある条件下で coherent な発振を生ずるに至る。Gunn は 1 Gc で 0.5 watt, 3 Gc で 0.155 watt の出力を得ており mounting unit を Fig. 6 に示した。実験によれば、発振電圧は sample の寸

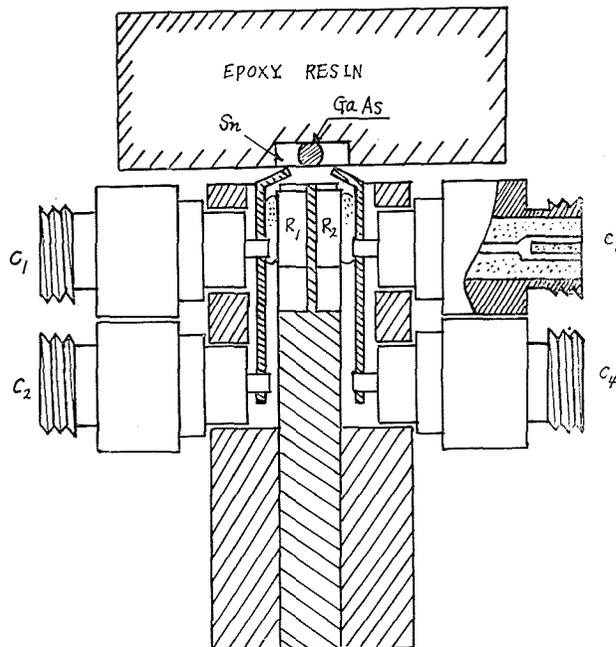


Fig. 6. A cross-sectional view of the mounting unit of GaAs used by Gunn.

法の長い程大であり、また発振周波数が高い程短い sample を必要とする。しかし寸法があまり長すぎると incoherent な instabilities を起すに至る。また多くの測定結果より sample 内の carrier の drift velocity は 10^7 cm/sec 程度となり、発振の原因が、単なる traveling-wave interaction か acoustic wave effect か明らかでない。

Hanson と Rowe²⁵⁾ は、GaAs を用いた elliptic cavity 型 mount で同様の実験を試みつつあるが、既に S 帯域で広帯域発振を観測しており、さらに波長 4~40 microns 帯でもかなりの出力を得た。測定結果によれば印加電圧や電流に関してある発振条件が存在し、また電流密度を増加すると、infrared 域の発振範囲が狭くなる傾向を有する。

これらの機構を説明すべく多くの理論が提案されたが、現在まで十分な解明が与えられていないようである。これらの諸提案を大別すれば次の様に要約し得る。すなわち

1. 電子の衝突による lattice の optical modes の励振とその増幅
2. electron-plasmon coupling すなわち drift carriers と semiconductor 内 plasma との相互作用
3. impurity scattering radiation と phonon modes との結合
4. traveling shock wave つまり高電界の進行波に基づくもの

に分類し得るが、多くの実験結果を十分に説明するまでには至っていない。しかし solid state plasma を含めた bulk phenomena に関し、ごく最近得られた Rowe らの実験と解析は、これらの発振機構をより明瞭にするものと思われる。

coherent 光の検波に使われる PIN junction photodiodes は、電子ビーム装置に見られるような増幅作用を有しないが、infrared 域における量子効率 η は、きわめて高くほぼ 100% に近づけ得る。したがって構造の簡単なこととあいまって infrared 域の復調装置として非常に秀れている。しかし不幸なことに狭帯域であり、またマイクロ波におけるこの種 photodiodes の等価抵抗 R_{eq} は低く、復調装置のよさ $\eta^2 R_{eq}$ は 10 ohms 以下で電子ビーム装置に比べて非常に低い²⁶⁾。しかし最近 bulk semiconductors のマイクロ波における R_{eq} が 1000 ohms 前後を示しており、今後の発展が期待される。

4. 結 言

マイクロ波帯より光波帯に至る電磁波発生および増幅装置に関する最近の研究の動向を述べた。

電子ビーム装置は 0.1 Gc より 100 Gc 帯の電子機器に広く使われている。しかし熱放散と電子ビームの電流密度の問題から、この装置は 1000 Gc 以下の高出力用機器に将来主用されるであろう。また強く密度変調をうけた高速度電子ビームの Cerenkov radiation は、サブミリ波および infrared 域で発展すると思われる。

固体電子装置は、マイクロ波の低い領域で既にかなり power を得ており、最近ではミリ

波でも相当な power を出している。すなわち junction devices は光波領域で活発な研究が続けられており、bulk semiconductors は S 帯域で数百 milliwatts の power を示し、infrared における動作についても興味ある結果が得られている。また phonon traveling-wave amplifiers は、transducer の改良と新しい材料の開発によって有望なマイクロ波増幅器となろう。

振幅変調や周波数変調をうけた coherent 光の復調装置は、急速な発展を示すであろうが当分の間 photodiodes と電子ビーム装置が主役をなすと考える。

おわりに長期間にわたり、米国および欧州における研究の機会を与えて下さった。北海道大学工学部長大塚博教授、北海道大学応用電気研究所長松本秋男教授さらに工学部電子工学科の方々に深く感謝する。また高速度電子ビーム装置や固体電子装置に関し種々御助言下さった The University of Michigan の Professor Joseph E. Rowe に深くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) E. W. Herold: "The Future of the Electron Tube", IEEE Spectrum, vol. 2, pp. 50-55; January, 1965.
- 2) G. Wade: "A Look at the Future of Tubes", IEEE International Convention Record, Part 5, pp. 87-90; March, 1965.
- 3) J. E. Rowe: "Generators and Amplifiers for Microwave through Optical Frequencies", New Research Frontiers in Physical Electronics, Proceeding of a Recognition Seminar in Honor of Professor W. G. Dow, pp. 104-128; December 3 and 4, 1964.
- 4) たとえば浅見義弘, 桜庭一郎: "ミリ波電子管の動向", 北海道大学応用電気研究所彙報, vol. 11, 3, pp. 136-158; 1959.
- 5) G. T. Konrad and J. E. Rowe: Unpublished Work on Cerenkov Radiation, Electron Physics Laboratory, Department of Electrical Engineering The University of Michigan.
- 6) B. J. McMurtry: "Microwave Phototube Design Consideration", Trans. PTGED-IEEE, vol. ED-10, pp. 219-226; July, 1963.
- 7) D. E. Caddes, B. J. McMurtry and A. E. Jacques: "The Traveling-Wave Phototube, Part I: Theoretical Analysis", Trans. PTGED-IEEE, vol. ED-11, pp. 156-163; April, 1964.
- 8) R. Targ, D. E. Caddes and B. J. McMurtry: "The Traveling-Wave Phototube, Part II: Experimental Analysis", Trans. PTGED-IEEE, vol. ED-11, pp. 164-170; April, 1964.
- 9) D. J. Blattner, H. C. Johnson, J. E. Ruedy and F. Sterzer: "Design and Performance of Microwave Phototubes Using Transmission Electron Multipliers", 1963 Electron Device Meeting, Washington, D. C.: October, 1963.
- 10) D. J. Blattner, H. C. Johnson, J. E. Ruedy and F. Sterzer: "Microwave Photomultipliers Using Transmission Dynodes" RCA Review, vol. 26, No. 1, pp. 22-41; March, 1965.
- 11) 桜庭一郎: "O 型光電子ビーム復調器による LASER 光の検波", 北海道大学工学部研究報告, 第 32 号, pp. 175-186; October, 1963.
- 12) I. Sakuraba and J. E. Rowe: "Partial Conversion of Current Modulation in Linear-Photoelectron Beam Systems", Trans. PTGED-IEEE, vol. ED-12, pp. 388-389; June 1965.
- 13) R. C. Miller and N. C. Witter: "High Speed Photomultipliers", IEEE International Convention Record, Part 5, pp. 7-16; March 1965.
- 14) R. C. Miller and J. E. Witter: "Secondary-Emission Amplification at Microwave Frequencies", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-1, pp. 49-59; April, 1965.

- 15) I. Sakuraba and J. E. Rowe: "Photodemodulation of Coherent Light Signals in Centrifugal Electrostatic Focusing Systems", Technical Report No. 75, Electron Physics Laboratory, Department of Electrical Engineering, The University of Michigan, September, 1964.
- 16) I. Sakuraba and J. E. Rowe: "Small-Signal Power Theorems and Dispersion in E-Type Electron Beams", Technical Report No. 76, Electron Physics Laboratory, Department of Electrical Engineering The University of Michigan: November, 1964.
- 17) S. E. Harris and A. E. Siegman: "A Proposed FM Phototube for Demodulating Microwave-Frequency-Modulated Light Signals", Trans. PGED-IRE, vol. ED-9, pp. 322-329: July, 1962.
- 18) I. Sakuraba and J. E. Rowe: Unpublished Work on FM Demodulators, Electron Physics Laboratory, Department of Electrical Engineering, The University of Michigan.
- 19) S. F. Paik, H-J. Krahn and B. H. Smith: "Wave Propagation in Pyrolytic-Graphite Slow-Wave Circuits", Trans. PTGED-IEEE, vol. ED-11, pp. 214-218: May. 1964.
- 20) その後数多くの論文が発表されており、たとえば 1964 Conference on Electron Device Research at Cornell University において多くの新しい研究が論議された。
- 21) I. Sakuraba and J. E. Rowe: Unpublished Work on Phonon Traveling-Wave Amplifiers, Electron Physics Laboratory, Department of Electrical Engineering The University of Michigan.
- 22) R. W. Harcourt, J. Froomand C. P. Sandbank: "Acoustic Amplifications in Semiconductors", Proceeding of the Joint Symposium on Microwave Applications of Semiconductors, Institution of Electronic and Radio Engineers and Institution of Electrical Engineers, Electronics Division, London, England, No. 28: June 30-July 2, 1965.
- 23) R. H. Rediker: "Recent Advances in Semiconductor Lasers" IEEE International Convention Record, Part 5, p. 1: March, 1965.
- 24) J. B. Gunn: "Instabilities of Current in III-V Semiconductors", IBM Jour. of Res. and Devel., vol. 8, No. 2, pp. 141-159: April, 1964.
- 25) D. Hanson and J. E. Rowe: Unpublished Work, Electron Physics Laboratory, Department of of Electrical Engineering, The University of Michigan.
- 26) A. E. Siegman, S. E. Harris and B. J. McMurtry: "Optical Heterodyning and Optical Demodulation at Microwave Frequencies", Proc. Symp. on Optical Maser, Polytechnic Institute of Brooklyn, vol. 13, pp. 546-566: April, 1963.