

液晶を用いたマイクロ波制御デバイス

九鬼 孝夫・鴨田 浩和・藤掛 英夫・野本 俊裕

Microwave Control Devices Using Liquid Crystal

Takao KUKI, Hirokazu KAMODA, Hideo FUJIKAKE and Toshihiro NOMOTO

Microwave control technology using liquid crystal (LC) is reviewed. LC has a large birefringence in permittivity in the microwave frequency range. The alignment of LC molecules can also be changed by using a bias electric field, so that the permittivity of the LC can be varied electrically. By using this feature of LC, various microwave variable delay lines using LC as dielectric substrate of microstrip transmission line were fabricated. Experimental results have shown that the phase shift of microwave can be controlled by varying the bias voltage. We also investigated lowering insertion loss and speeding-up the phase-shift response time on the LC variable delay line.

Key words: liquid crystal, microwave, permittivity, variable delay line, phase shifter

将来のユビキタス社会実現のための無線伝送技術のひとつとして、さまざまに変化する無線環境の中でも環境変化に適応して送受信が安定に行える、アダプティブ技術が注目されている。そして、これを支える高周波技術として、高周波信号の振幅、位相や周波数などを電子的に変化させることのできるデバイスが検討されている。このような研究は、従来、フェライトや強誘電体を利用したデバイスについて多数の報告がある。その動作原理は、マイクロ波の伝搬媒体である誘電体や磁性体の誘電率や透磁率を外部からの信号で変化させることにより、マイクロ波の振幅や位相などの伝送特性を制御するというものである。

誘電率を変化させることのできる材料として、ディスプレイ材料へ多用されている液晶に注目する。液晶は、外部からのバイアス電界に応じて分子の配向が変化し、誘電率が変化する¹⁾。この性質を利用すれば、高周波伝送線路の伝送特性を外部から電子的に制御できるマイクロ波デバイスの実現が可能となる。このようなデバイスは、導波管にネマチック液晶を充填した電圧制御ミリ波帯可変移相器²⁾や、マイクロストリップ線路の誘電体基板としてネマチック液晶を用いたマイクロ波・ミリ波帯の広帯域可変移相器³⁾などが、すでに報告されている。本稿では、NHK 放送

技術研究所でこれまで進めてきた、液晶を用いてマイクロ波を制御するデバイスに関する研究成果⁴⁻⁸⁾の一端を紹介する。

1. 液晶のマイクロ波帯での誘電特性^{4,7)}

液晶の誘電特性は、光や比較的周波数の低い電界の領域ではよく知られているが、マイクロ波やミリ波帯における測定の報告例は少ない^{2,3,9,10)}。そこで、液晶をマイクロ波デバイスへ応用することを目的に、16種類のネマチック液晶のマイクロ波帯誘電特性を測定した。図1に、液晶の誘電特性の測定系を示す。液晶を同軸線路に充填し、その伝搬遅延時間と挿入損を測定する。そして、伝搬遅延時間から液晶の比誘電率を、挿入損から液晶の誘電損を求める。ここで、同軸線路の中心導体と外部導体間にバイアス電圧を印加して液晶の配向を制御することにより、マイクロ波電界に平行な場合の比誘電率 $\epsilon_{r(//)}$ 、誘電損 $\tan\delta_{(//)}$ と垂直な場合の比誘電率 $\epsilon_{r(\perp)}$ 、誘電損 $\tan\delta_{(\perp)}$ を測定できる。

ネマチック液晶の周波数 20 GHz での誘電特性の測定結果を表1に示す。多くの液晶の比誘電率は 2~3 程度で、 $\epsilon_{r(//)} > \epsilon_{r(\perp)}$ である。また、比誘電率はマイクロ波帯では周波数に依存せずほぼ一定で、液晶を用いたマイクロ波デバイスは、非常に広帯域な動作が期待できる。一方、誘電損

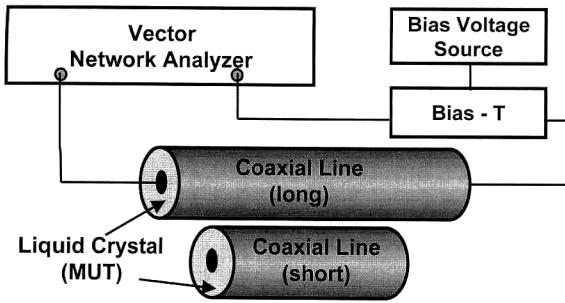


図1 液晶の誘電特性測定系。

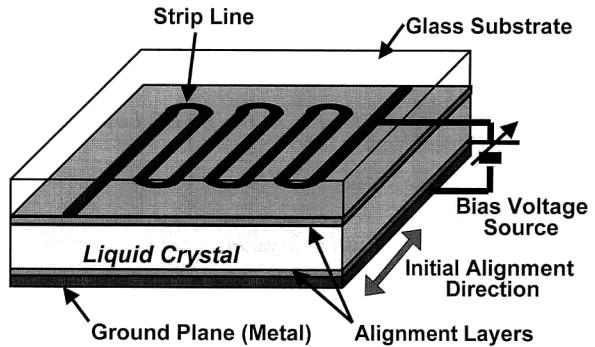


図2 液晶を用いた可変遅延線の構造。

表1 20 GHz での液晶の誘電特性。

液晶種類	ϵ_r			$\tan\delta$	
	//	\perp	$\Delta\epsilon$	//	\perp
BL-036	3.1	2.5	0.6	0.01	0.03
BL-008	3.1	2.6	0.5	0.01	0.03
BDH E-7	3.0	2.5	0.5	0.01	0.03
JB-1024	2.9	2.4	0.5	0.01	0.04
JB-1025	2.5	2.1	0.4	0.01	0.02
TL-215	2.9	2.6	0.3	0.01	0.02
JB-1021	3.0	2.7	0.3	0.01	0.02
MLC-6848-100	2.6	2.3	0.3	0.01	0.04
MJ 991619	2.7	2.4	0.3	0.01	0.04
JB-1026	2.8	2.6	0.2	0.01	0.03
JB-1020	2.6	2.4	0.2	0.01	0.04
MLC-6848-000	2.6	2.4	0.2	0.01	0.03
JB-1023	2.6	2.5	0.1	0.03	0.11
JB-1022	3.0	2.9	0.1	0.02	0.02
EN-38	2.6	2.5	0.1	0.03	0.06
MLC-2038	2.5	2.5	0.0	0.06	0.05

は、アルミナやテフロンなどの通常の高周波用誘電体と比べると1~2桁程度大きく、デバイスの挿入損増加を招く要因のひとつになると考えられる。

2. 液晶可変遅延線の試作・評価⁴⁾

高周波伝送線路を通過する信号の伝搬遅延時間は、一般に、その線路を構成する誘電体の実効誘電率の平方根に比例する。したがって、液晶を伝送線路の誘電体として用いてその誘電率を変化させれば、マイクロ波の伝搬遅延時間を制御でき、マイクロ波可変遅延線を実現できる。ここでは、液晶のマイクロ波帯誘電特性の測定結果をもとに、マイクロストリップ線路型の可変遅延線を設計・試作した。図2に示すように、ガラス基板とグランド金属の間に液晶を封じ込め、液晶層をマイクロストリップ線路の誘電体基板とする構造である。液晶層の厚さを50 μm、導体線路幅を100 μm(このとき線路の特性インピーダンスを50 Ω)、線路長は193 mmとした。液晶の比誘電率は、配向膜の初期配向方向をマイクロ波電界に垂直に設定することによりバイアス電圧0 Vで $\epsilon_{r(\perp)}$ となり、バイアス電圧を増加するに従い $\epsilon_{r(/)}$ へと変化する。そして、可変遅延線の遅延時間

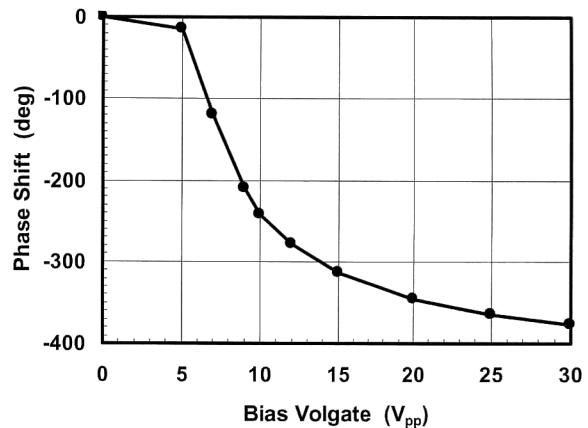


図3 可変遅延線の移相特性(測定周波数20 GHz)。

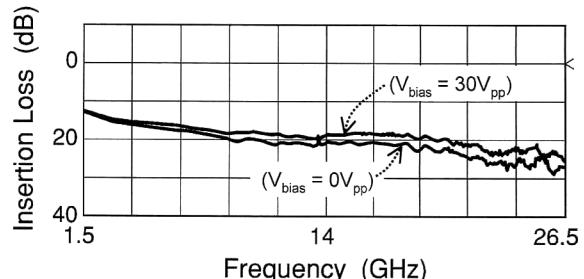


図4 可変遅延線の挿入損。

(あるいは移相)も、これに伴い変化することになる。

試作可変遅延線のバイアス電圧(5 kHzの正弦波)変化による移相特性(測定周波数20 GHz)を図3に示す。バイアス電圧を0 V_{pp}から30 V_{pp}に増加させたときの移相は370度で、設計どおりの特性が得られた。また、試作可変遅延線は、マイクロ波帯の広い周波数帯域にわたり非分散性の遅延特性をもつこともわかった。

図4に、バイアス電圧0 V_{pp}と30 V_{pp}のときの挿入損の測定結果を示す。バイアス電圧30 V_{pp}での挿入損は、周波数20 GHzで約20 dBである。これは実用的にはやや大きな値であり、挿入損の低減が必要である。そこで、試作可

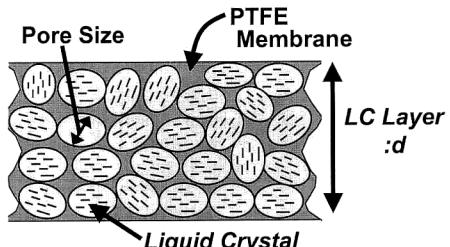


図5 液晶含浸樹脂のイメージ。

変遅延線の挿入損の内訳を考えると、液晶による誘電損約4dB、導体線路などの金属の抵抗による導体損約12dB、その他の損失約3dBであり、試作可変遅延線の挿入損は導体損が支配的であることがわかった。導体損が大きいのは、液晶層厚さ $50\mu\text{m}$ で線路の特性インピーダンスを 50Ω に設計したことにより、導体線路幅が $100\mu\text{m}$ と細くなり抵抗が大きくなつたためと考えられる。これより、液晶層を厚くして導体線路幅を広げれば、挿入損を大幅に改善できることを示した。

3. 新しい液晶可変遅延線⁸⁾

可変遅延線の挿入損低減のためには、液晶層を厚くすればよいことがわかった。しかし、液晶デバイスは一般に、液晶層を厚くすると液晶の配向に必要な応答速度が遅くなるなどの問題が生じる¹⁾。この結果、可変遅延線の挿入損低減とバイアス電圧変化に対する移相変化の応答を同時に満足させることは難しい。そこで、これを解決するためのひとつ的方法として、多孔質樹脂(PTFE)膜にネマチック液晶をしみ込ませた「液晶含浸樹脂」を、液晶可変遅延線の液晶層に用いることを考案した。液晶含浸樹脂のイメージを図5に示す。マイクロ波デバイスとしての液晶層厚さは、膜の厚さとして任意に設定できる。一方、液晶は液晶層の厚さにかかわらずその近傍の樹脂表面からの影響を受け、液晶配向の応答速度は液晶層が薄い場合と同様に速くなる。液晶含浸樹脂を用いた液晶層厚さ $100\mu\text{m}$ の可変遅延線を試作した結果、バイアス電圧除去時の移相応答時間は33msとなり、従来の可変遅延線⁴⁾に比べ2桁も速くできることがわかった。

「誘電率を調節できる」という液晶特有の性質

を利用し、液晶のマイクロ波・ミリ波制御デバイスへの適用可能性について検討した。液晶は、このようなデバイス用材料として大きなポテンシャルをもち、最近では高周波応用を目的とした材料研究の成果¹¹⁾も報告されている。液晶を用いたマイクロ波制御デバイスの実現に際しては、挿入損や応答速度の改善が課題であり、デバイス構造や液晶材料のさらなる研究が必要である。

文 献

- 1) 岩柳茂夫：液晶（共立出版，1984）。
- 2) K. C. Lim, J. D. Margerum and A. M. Lackner: "Liquid crystal millimeter wave electronic phase shifter," *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993) 1065-1076.
- 3) F. Guerin, J. M. Chappe, P. Joffre and D. Dolfi: "Modeling, synthesis and characterization of a millimeter-wave multilayer microstrip liquid crystal phase shifter," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 4409-4413.
- 4) 九鬼孝夫, 藤掛英夫, 野本俊裕, 内海要三：“液晶を用いたマイクロ波可変遅延線の設計とその挿入損に関する一考察”，電子情報通信学会論文誌(C), **J84-C** (2001) 90-96.
- 5) H. Fujikake, T. Kuki, T. Nomoto, Y. Tsuchiya and Y. Utsumi: "Thick polymer-stabilized liquid crystal films for microwave phase control," *J. Appl. Phys.*, **89** (2001) 5295-5298.
- 6) T. Kuki, H. Fujikake and T. Nomoto: "Microwave variable delay line using dual-frequency switching mode liquid crystal," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-50** (2002) 2604-2609.
- 7) 鴨田浩和, 九鬼孝夫, 藤掛英夫, 野本俊裕：“同軸線路による液晶のマイクロ波帶誘電特性の評価”，電子情報通信学会論文誌(C), **J85-C** (2002) 776-777.
- 8) T. Kuki, H. Fujikake, H. Kamoda and T. Nomoto: "Microwave variable delay line using a membrane impregnated with liquid crystal," *IEICE Trans. Electron.*, **E86-C** (2003) 1699-1703.
- 9) B. A. Belyaev, N. A. Drokin, V. F. Shabanov and V. N. Shepov: "A study of the microwave dielectric permittivity of liquid crystals in electric and magnetic fields," *Tech. Phys.*, **43** (1998) 105-109.
- 10) 鍋和田啓介, 橋本修, 平田圭一, 都甲康夫：“X帯における液晶材料の複素誘電率測定法と測定結果”，電子情報通信学会論文誌(B), **J84-B** (2001) 945-947.
- 11) C. Weil, St. Müller, P. Scheele, P. Best, G. Lüssem and R. Jakoby: "Highly-anisotropic liquid-crystal mixtures for tunable microwave devices," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1732-1734.

(2004年1月10日受理)