

電界吸収型光変調器を用いた短光パルス生成のモデル化

横井 貴樹*, 脇田 紘一**

Modeling Short Optical Pulse Generation Using
Electroabsorption Modulators

Takashi YOKOI* and Koichi WAKITA**

(Received October 31, 2001)

Ultra-short optical pulses synchronized to an electrical clock are required in ultra-high bit rate soliton transmission and optical signal processing systems. Use of sinusoidally-driven electroabsorption (EA) modulators is described to generate transform-limited optical pulses. We model pulse generation in sinusoidally-driven lumped-electrode EA modulators, defining a new device figure of merit. Generated optical pulse width is calculated as a function of extinction ratio slope for applied voltages and 3dB bandwidth, and calculated results are compared with those reported for various modulator structures that include bulk modulators, InGaAs/InAlAs, and InGaAsP/InGaAsP multiple quantum well (MQW) modulators. This model is useful for designing and using EA modulators in optical short pulse applications.

Keywords : optical pulses , soliton transmission, sinusoidally-driven,
electroabsorption modulators, transform-limited

1. まえがき

長距離、大容量伝送を目指した光ファイバ通信システムでは、現在光ソリトン伝送が次世代の超高速光通信の実現に向けて盛んに研究されている。この方式の有効な理由としては、まず、第1にシリカ系ファイバの伝送損失が最小となる波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯において光ソリトンを比較的容易に得られるパワーレベルで発生できること、第2に非常に狭い光パルスは長距離伝送できること、第3にソリトンの形をとる光パルスは通常の伝送で長距離伝送に伴って生ずる波形歪みがないこと、第4に波長によって光パルスの伝搬速度が異なることがないので、波長分割多重伝送システムが可能になること、第5に入射パラメータ（例えば入射光パルスの幅やピークパワーなど）を広い範囲で変えてもソリトン形成を妨げることが少ないので実際の応用に利用可能であること、などが

挙げられる。

光ソリトン伝送用の短光パルス生成には、これまでモードロック法^{1),2)}や利得スイッチ法³⁾が用いられてきた。このうち、モードロック法では入射光の繰り返し周波数は試料の長さ(Lとする)で決められる共振器長で決まってしまうため、周波数を合わせるのが困難である。また、利得スイッチ法では半導体レーザを直接パルス駆動によって容易に短光パルスを生成することができる。しかし直接変調なので波長揺らぎ(チャーピングと呼ばれる)が大きく、スペクトルは広がってしまい、光伝送で必要とされるスペクトル幅にするにはフィルタなどを用いる必要があった。このため光出力が低下してしまう。これに対して電界吸収型(Electroabsorption: EA)光変調器を用いる方法⁴⁾は、装置が小型で堅固、パルスの安定性に優れ、外部的な信号による繰り返し周波数が自由に設定でき、発生する光パルスの時間幅は、そのスペクトル幅との積が理論的に予測される値に近いパルスが得られる特徴がある。

*電気工学専攻大学院生(Graduate Student, Electrical Engineering)

**電子工学科(Department of Electronic Engineering)

本論文では、これまでいくぶん試行錯誤的な方法で変調器の動作条件を求めてきたものを、EA変調器を用いた短光パルス生成のモデル化をおこない、変調器の素子性能からどれほど小さなデューティサイクルやパルス幅を得ることができるかを求めた。その結果の妥当性をこれまでに報告されている各種EA変調器のデータと比較する。

2. EA変調器の構造と動作原理

図1にEA変調器の構造の模式図を示す。コアと呼ばれる屈折率の大きな部分の両側をこれより屈折率の小さいクラッド層で挟んだ、いわゆる光導波路の構造をしており、試料の片端面から入射された光がコア層を通って出射端面より放出される。通常、コア層はノンドープであり、その両側のクラッド層は各々高濃度にP、Nの不純物が添加されていて、外部から電圧を加えたとき、電界がノンドープのコア層に均一に印加できるようになっている。素子容量低減のため電極形成に必要なボンディングパッド部の下に、誘電率の低いポリイミドを埋め込んである。コア層の構成方法によって単一の結晶からなるものをバルク型といい、多重量子井戸(Multiple Quantum Well: MQW)構造からなるものと区別されている。これは以下に述べる印加電圧による吸収係数の変化が両者で異なっているためである。

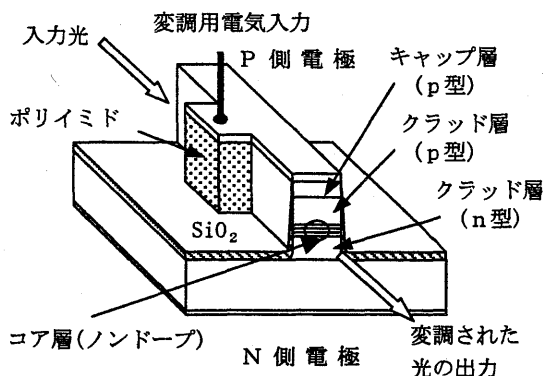


図1 変調器の構造の模式図

図2はコア部がMQW構造からなっているEA変調器の印加電圧による吸収係数の変化⁹⁾を示す。電圧を加えると吸収係数が長波長側にシフトするため電圧が零のとき透明であった状態が印加電圧により不透明になるという特性があるので、光の強度変調に利用できる。コア部の構成の違いによってこの吸収係数の電界による変化に違いができ、バルク型ではフランツ・ケルディシュ効果と呼ばれ吸収係数の根が変化する。他方、MQW構造では励起子による吸収（図2でピーク部分を指す）が室温においても観測され、これが長波長側にシフ

トするため量子閉じ込めシュタルク効果(Quantum-Confined Stark Effect: QCSE)と呼ばれている。いずれにしても電圧を加えて吸収係数が変化することは同じで透過光の強度は電圧に対して非線形に変化する。透過光の強度 I は、入射光の強度を I_0 とすると吸収係数 α を用いて次のように表される。

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 x は光の伝搬方向を x 軸にとったとき、試料の入射端から測った長さである。したがって、消光比は I/I_0 となる。

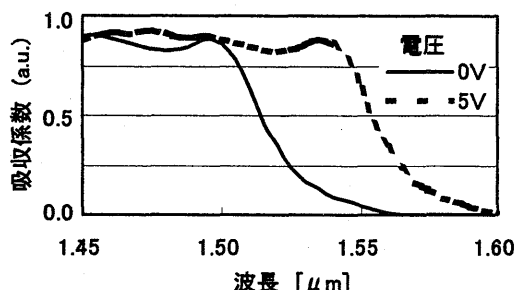


図2 EA変調器の印加電圧による吸収係数の変化

3. EA変調器による短光パルス生成のモデル化

EA変調器を用いて短光パルスを生成するための実験系を図3に示す。波長 $1.55\mu\text{m}$ のCWレーザ光をEA変調器に入射し、EA変調器の電極にはバイアスティを介してDC電源からバイアス電圧を、正弦波発生器から交流振幅電圧をかけると、短光パルスが出力される。

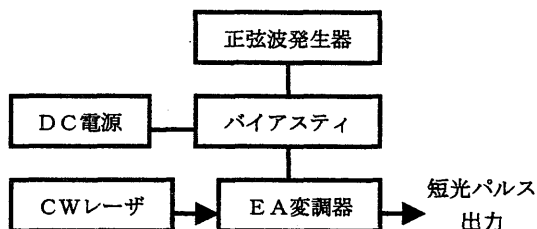


図3 EA変調器を用いた短光パルス生成の実験系

EA変調器を用いた短光パルス生成の動作原理は透過光量が印加電圧に対して非線形となることを利用し⁹⁾、大振幅の正弦波電圧を加えてその半周期以下の光パルスを得ることである。図4に動作原理を示す。EA変調器に電圧を加えて吸収係数を変化させ、透過光強度が変調を受けることを利用している。透過光強度と入射光強度の比は吸収係数の変化に対して指数関数となる。吸収係数は印加電圧 V を用いて近似的に $\exp\{-(V/V_0)^4\}$

と表現できる⁷⁾。ここで、 V_0 は消光比が e^{-1} となる電圧であり、図4は V_0 をパラメータに透過光の違いを示す。通常、指数 a はバルク構造で用いられるEA変調器では1~2、MQW構造では2~5となるため、狭い光パルスを低い電圧で得るにはMQW構造が有利である。

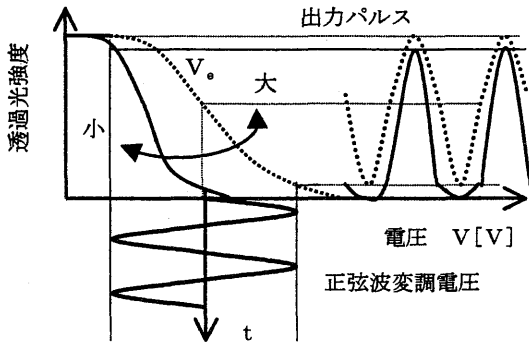


図4 EA変調器による短光パルス生成の原理

図4の縦軸での透過光強度の最大値と最小値の比を取り、その値を消光比 T とし、消光比が印加電圧 V に対して比例すると仮定する。消光比の傾きを T_V [dB/V]として、モデル化したものを図5に示す。図5では消光比をdBで表したとき消光比 T_{dB} は次のように表現される。

$$T_{dB}(V) = 10 \log(T) = -T_V \cdot V \quad (2)$$

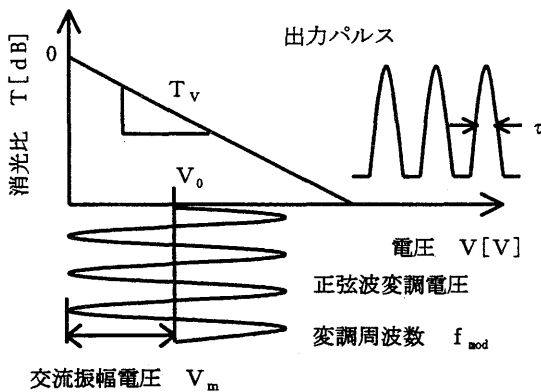


図5 EA変調器による短光パルス生成のモデル化

変調器にかかる電圧 V_a は次のように表現される。

$$V_a(t) = V_0 + V_m \cos(2\pi f_{mod} t) \quad (3)$$

ここで、 V_0 : バイアス電圧、 V_m : 交流振幅電圧、 f_{mod} :

変調周波数、 t : 時間である。式(3)の入力信号の条件から生成されたパルスの半値幅を τ とし、生成されたパルスの消光比の最小値を零として近似すると次のように表現される。

$$\tau = \frac{1}{\pi f_{mod}} \sqrt{\frac{20 \log 2}{T_V V_m}} \quad (4)$$

しかし、変調器には図6に示すような周波数特性があるため、周波数が高くなるにつれ消光比が減少する。式(3)において図6の周波数特性を考慮し、このときの電圧を V とすると次式となる。

$$V(f) = V_a(f) / (1 + j f_{bw} / f_{mod}) \quad (5)$$

ここで、 f_{bw} : 消光比の3 dB帯域周波数である。

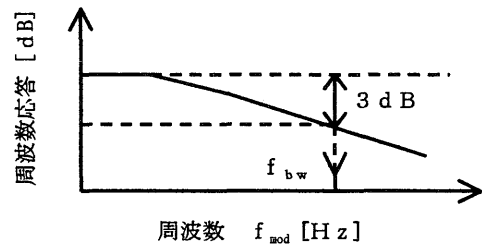


図6 EA変調器の周波数特性

印加する交流振幅電圧 V_m はフーリエ変換すると次式となる。

$$\begin{aligned} V_m &\xrightarrow{F} \int_{-\infty}^{\infty} V_m(t) \exp(-j2\pi ft) dt \\ &= \frac{V_m}{\sqrt{1 + j(f_{mod}/f_{bw})}} \quad (6) \end{aligned}$$

これを式(4)に代入し、次式でデューティサイクル d は

$$d^2 = (\tau f_{mod})^2 = \frac{20 \log 2}{\pi^2 T_V V_m} \sqrt{1 + (f_{mod}/f_{bw})^2} \quad (7)$$

となる。

4. 結果および考察

これまでに報告されたデューティサイクルの値と式(7)を用いて計算した理論値とを比較すると表1になる。また、式(7)の関係式からルート内の周波数成分を横軸、デューティサイクルを縦軸とし、デューティサイクルの3 dB帯域幅で正規化した周波数帯域依存性を図7に示す。パラメータは $T_V V_m$ (消光比の傾きと交流振幅電圧の積)をとっている。図7から消光比の傾きと振幅電圧の積が大きく、変調周波数と3 dB帯域幅の比が小さいほど、デューティサイクルが小さくなる事が分かる。

報告値と計算値の比較をすると、文献8と9ではそれぞれの報告値が13%、7%であったのに比べ、それぞれの計算値は28%、15%で2倍以上も大きい。文献10と11では報告値と計算値が近い値を示している。この結果では本来、バルク構造とMQW構造を比較すると、バルク構造の方が消光比の電圧依存性を表す指数 a の値は1に近いことが報告されているので「変調器の消光比が印加電圧に対して比例する」という仮定条件では報告値と計算値が一致しやすく、誤差が小さくなるはずである。他方、MQW構造では a の値は1より大きいので差が大きくなるはずである。しかし、得られた結果では、バルク構造の方が、MQW構造に比べ誤差が大きい。

表1 デューティサイクルの報告値と理論値

文 献	f_{bw} [GHz]	f_{mod} [GHz]	L [μm]	T_v [dB/V]	V_a [V]	d [%]	
						exp.	cal.
8	5	20	210	8.8	3.6	13	28
9	14	20	200	15.0	3.0	7	15
10	15-20	20	100	10.0	1.6	28	23-25
11	14	10	371	7.5	3.7	15	16
12	22	10	130	13.0	0.8	18	26
13	2	3.5	275	4.9	4.0	18	25

*** 文献8; InGaAsP バルク, 文献9, 11, 12, 13; InGaAsP/InGaAsP MQW, 文献10; InGaAs/InAlAs MQW

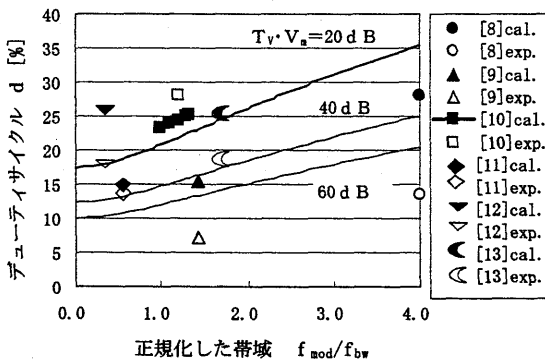


図7 デューティサイクルの3 dB帯域幅で正規化した周波数帯域依存性

報告値と計算値での比較データが a の値を1と単純化したにもかかわらずMQW構造変調器(文献10と11)では比較的良好一致を示した。これは指数 a の値は消光比の大きな領域で、すなわち光パルスの裾に相当する部分で効いてくるため、パルスの半値幅にはそれほど影響がないことによっている。本モデルでは消光比は電圧に比例するとしてバイアス依存性は無視したが、M

QW構造ではバイアス依存性は大きくなるはずであり、今後これを取り入れた計算を進め実験とのずれを減らしていくことが課題である。また文献8と9のデータがあまりにも計算値と違ったのはバイアスや指数 a の値の取り方では定量的に説明できず、報告されている消光比や3 dB帯域幅のデータに疑問を投げかけざるを得ない。

以上より、比較的簡単なモデル化でE A変調器の素子性能からデューティサイクルを求めることができた。今後はより実際に近い条件で計算し、精度を上げていきたい。

参考文献

- 1) M. Nakazawa, E. Yamada, H. Kubota and K. Suzuki: "10Gbit/s Soliton Data Transmission Over Million Kilometres", Electron. Lett., 27, 14, 1270-1272 (1993)
- 2) P. B. Hansen, G. Raybon, U. Koren, B. I. Miller, M. G. Young, M. Chien, C. A. Burrus and R. C. Alferness: "5.5- μm Long InGaAsP Monolithic Extended-Cavity Laser with an Integrated Bragg Reflector for Active Mode-Locking", Photon. Techn. Lett., 4, 3, 215-217 (1992-3)
- 3) M. C. Wu, Y. K. Chen, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, M. A. Chin and G. Raybon: "Transform-Limited 1.4ps Optical Pulses from a Monolithic Colliding-Pulse Mode-Locked Quantum Well Laser", Appl. Phys. Lett., 57, 8, 759-761 (1990-8-20)
- 4) 池上徹彦, 土屋治彦, 三上修: "半導体フォトニクス工学", コロナ社, 432-433 (1995)
- 5) 小島友和, 脇田紘一: "多重量子井戸構造吸収型光変調器の損失評価", 中部大学工学部紀要, 36, 11-14 (2000-12)
- 6) K. Kawano, K. Wakita, O. Mitomi, I. Kotaka and M. Naganuma: "Design of InGaAs/InAlAs Multiple-Quantum-Well (MQW) Optical Modulators", IEEE J. Quantum Electron., 28, 1 (1992-1)
- 7) O. Mitomi, S. Nojima, I. Kotaka, K. Wakita, K. Kawano and M. Naganuma: "Chirping Characteristic and Frequency Response of MQW Optical Intensity Modulator", J. Lightwave Technol., 10, 1, 71-77 (1992-1)
- 8) M. Suzuki, H. Tanaka, N. Edagawa, K. Utaka and Y. Matsushima: "Transform-Limited Optical Pulse Generation up to 20-GHz Repetition Rate by a Sinusoidally Driven InGaAsP Electroabsorption Modulator", J. Lightwave Technol., 11, 3, 468-473 (1993-3)
- 9) S. Oshiba, K. Nakamura and H. Horikawa: "Low-Drive-Voltage MQW Electroabsorption Modulator for Optical Short-Pulse Generation", IEEE J. Quantum Electron., 34, 2, 277-281 (1998-2)
- 10) K. Wakita, I. Kotaka, O. Mitomi, H. Asai and M. Asobe: "Optical Pulse Generation with High Repetition Rate by

- Sinusoidally-Driven InGaAs/InAlAs Multiquantum Well Modulator", Electron. Lett., 29, 8, 718-719 (1993-4-15)
- 1 1) D. G. Moodie, M. J. Harlow, M. J. Guy, S. D. Perrin, C. W. Ford and M. J. Robertson: "Discrete Electroabsorption Modulators with Enhanced Modulation Depth", J. Lightwave Technol., 14, 9, 2035-2043 (1996-9)
- 1 2) F. Devaux, P. Bordes, N. Souli, S. Chelles, A. Ougazzaden, A. Mircea, M. Carre and F. Huet: "High-Performance Polarisation Insensitive MQW Electro-absorption Modulator with Bandwidth Over 20GHz", ECOC' 94
- 1 3) G. Raybon, P. B. Hansen, U. Koren, B. I. Miller, M. G. Young, R. M. Jopson, J. D. Evankow and C. A. Burrus: "Gain-Switching of DBR Laser Monolithically Integrated with Electroabsorption Modulator for RZ Transmission", Electron. Lett., 28, 2, 188-190 (1992-1-16)