

電子空乏化を用いた半導体光変調器に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16105

氏名	桑村有司
生年月日	
本籍	徳島県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第139号
学位授与の日付	平成9年3月25日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	電子空乏化を用いた半導体光変調器に関する研究
論文審査委員	(主査) 山田 実 (副査) 鈴木正國, 長野 勇 畑 朋延, 飯山 宏一

学位論文要旨

Abstract:

Operations of newly proposed semiconductor optical modulators basing on absorption control by electron depletion around the p-n junctions were demonstrated, forming structures of waveguide-type and surface-illuminated (or panel) type devices. In this dissertation, operating mechanisms of new optical modulators were theoretically analyzed and operating characteristics were reported. Obtained extinction ratios in waveguide-type and surface-illuminated type intensity modulators are 35dB with 4V variation of applied vantage and 10dB with 7.5V variation of applied voltage, respectively. Two dimensional arrays with 99 elements of surface illuminated type modulators were achieved.

第1章 序論

現在、社会的に要求される情報量は増加の一途をたどっており、この要求に答える技術として光を利用した通信や情報処理技術が急速に進展している。光技術では時間的な情報や空間的な情報を光波に乗せて大容量の通信や情報処理ができるため、光通信技術が発展し、また並列光コンピュータなどの光並列情報処理の構想が推進されている。光波を情報の伝送や処理媒体として利用するためには、光波の中に信号を乗せるための光変調器や光スイッチが必要となり、これらの光デバイスの高速化、高性能化や低電力化が望まれている。本論文は、上記の社会的な要請に基づき、高速で大容量の情報処理が可能な低消費電力の半導体光変調器の開発を目指し、光通信用として

導波路型、並列情報処理用として面型光変調器の開発を行ったものである。

素子開発に当たり、本研究では「半導体中の電子が空乏化すると、光吸収が増加する」という原理で動作する光変調器を新たに提案し、EDAC(Electron Depleting Absorption Control)光変調器と名付け、素子開発を行った。提案した面型EDAC光変調器の素子構造を図1に示す。半導体中のp-nまたはp-i-n接合面での空乏層厚を逆バイアスで可変制御して透過光を強度変調するものである。

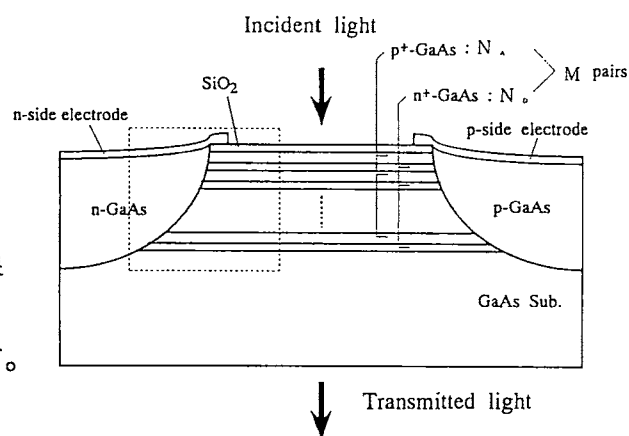


図1. 面型EDACの素子構造

第2章 半導体光変調器の物理と分類

半導体光変調器は使用目的や形状など多種多様な側面から分類し、変調器に利用される半導体中の物理現象やこれまでに開発されている各種の半導体光変調器の特性についてまとめた。

第3章 半導体中の電子と電磁界との相互作用

直接遷移型半導体中ではバンド間電子遷移による光吸収率を制御して透過光の強度変調が行われるが、従来の光吸収率の理論解析は光吸収端より低エネルギー側に観測される「テイル」状の光吸収を精度良く解析することができなかった。この事実は半導体中の電子の衝突による電子波動の位相の乱れが原因で起きること指摘されていたが、光吸収率を精度良く計算する解析手法は確立されていない。そこで密度行列の運動方程式に電子緩和効果を精度良く導入する解析手法を提案し、光吸収率を解析した。半導体中の一つの電子-正孔対が作る双極子振動は、電子散乱により振動の位相が乱され減衰振動を行っている。電子散乱を引き起こすハミルトニアン H_{sc} の2次相関が $\exp\{-t/\tau_s\}$ に従って時間減衰すると仮定して、密度行列の応答を運動方程式の形で明記した。単位インパルス電磁界に対する密度行列要素の応答を示し、連続的な電磁界との相互作用に対してはそのインパルス応答の重ね合わせで行列要素を表現して、光吸収率を解析した。この手法をフランチ・ケルディッシュ効果の理論解析に応用して、光吸収係数 α を算出した。図2にGaAs結晶に対する解析結果を示す。実線が電子緩和効果を考慮した本解析結果、波線が考慮していない従来の解析結果、各点印が実験値である。本解析結果は実験値とのよい一致を得た。本理論は「テイル」状の光吸収特性やフランチ・ケルディッシュ効果の実験データを精度良く記述することが出来た。この解析手法は光デバイス設計および特性解析の基礎理論となるものである。

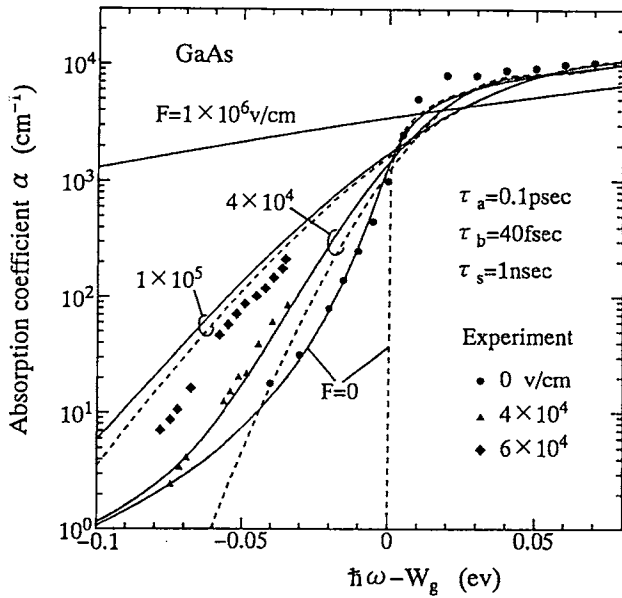


図2. 光吸収率の理論解析

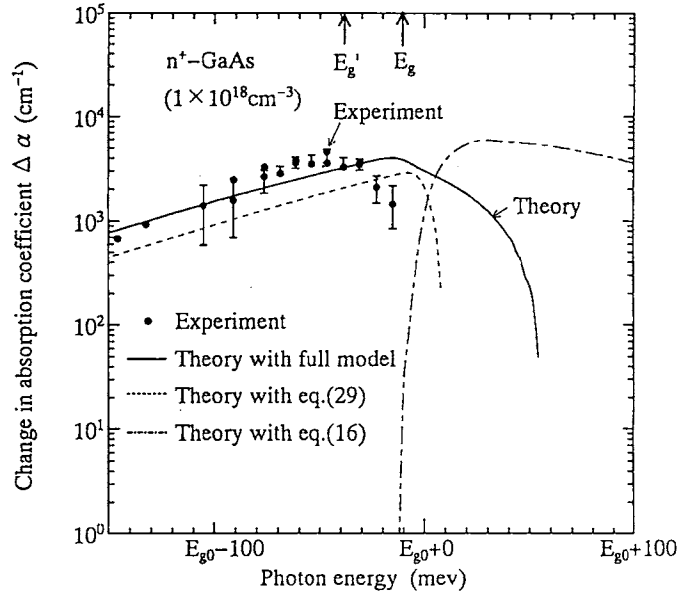


図3. 電子空乏化による光吸収率変化

第4章 電子空乏化による光吸収の動作機構解析

4章では電子空乏化を利用した光吸収制御法の動作機構について理論的に検討し、素子設計のための理論解析モデルを提案した。また、実験データとの比較も行った。電子空乏化による光変調動作では、不純物を添加した半導体を用いるので、本来のバンドーバンド間の他にバンドー不純物準位間やバンドー不純物バンド間の電子遷移確率も変化し、光吸収が増加する。理論解析では、不純物準位や不純物バンドを考慮したバンドモデルを仮定して、半導体を空乏化することで生じる3種の現象を取り扱った。空乏領域中では、伝導帯中の電子数（または正孔数）が減少するため、1)フェルミ準位が変化したり、2)スクリーニング効果（イオン化した不純物原子が作るクーロンポテンシャル形状を自由電子が変形させる効果）が減少し不純物のエネルギー準位が移動する。さらに、3)フランツ・ケルディッシュ効果（帯電した不純物原子による内部電界の変化がバンド内電子のエネルギー準位を変化させる現象）も考慮して、光吸収係数を解析した。図3にはn-GaAs結晶($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)を電子空乏化した時の光吸収係数変化 $\Delta \alpha$ の解析結果を実線、実測値を●印で示したが、両値は一致し、光吸収のメカニズムとして上記1)~3)の現象が存在することを明らかにした。

第5章 半導体光変調器の設計

面型光変調器として $p^+-AlGaAs/n^+-AlGaAs/n-GaAs/n^+-AlGaAs$ 多層ヘテロ構造を M 周期積層して、横方向から電圧を印加する方式の素子構造を提案し、4章での解析モデルを利用して面型光変調器の素子設計を行った。その結果を図4に示す。素子の消光性能は n^+-GaAs 層の不純物濃度 N_D とpn構造の積層数 M で決まり、5Vの電圧変化で消光比（光透過/遮断の比）10dBの素子性能が実現できることが分かった。また、素子の動作速度は数百MHzまで高速化できることを示した。

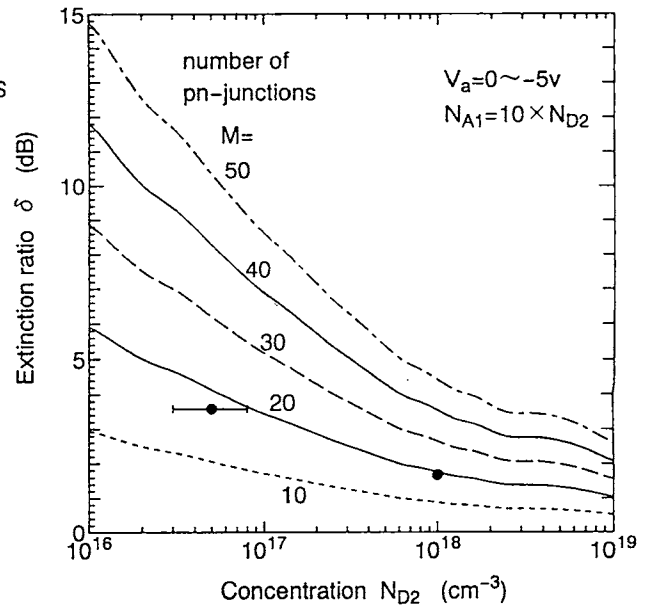


図4. 面型EDACの消光特性の設計

第6章 III-V族半導体混晶の結晶成長

本研究では液層エピタキシャル結晶成長法を用いてAlGaAs結晶を成長し、各種の光変調器を作製したが、この章では液相結晶成長法について述べた。使用した成長装置について説明した後、半導体結晶の基本的物性、熱力学を通して液相エピタキシャル成長についての基本事項を述べた後、実際に成長した結晶膜についての結果をまとめた。

第7章 電子空乏化を用いた半導体光変調器

本研究で開発した半導体光変調器の動作、素子構造、作製法、素子特性について述べた。作製した各種の光変調器の素子特性を表1.にまとめた。導波路型では4Vの電圧変化で35dBの消光比（光透過/遮断の光強度比）の光強度変調器が実現できた。高速仕様で作製した素子の動作速度は4.6GHzである。一方、図1の素子構造の面型では7.5Vの電圧変化で10dBの消光比が確認された（図5）。7.5Vの低電圧で消光する透過型の半導体光変調器の開発は世界初である。そして、この面型素子を6行6列に2次元配列したアレー光変調器を試作し、「K」という文字画像の出力にも成功した（図6）。入射光の透過率が15%（挿入損失8dB）と小さいことや各素子への電気配線の方法など並列情報処理用面型光変調器の実用化へに向けての課題はいくつか残されているが、提案した電子空乏化を用いた半導体光変調器の優位性を実証することができた。

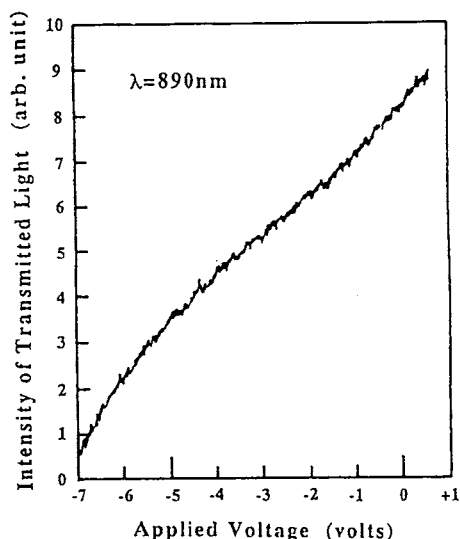
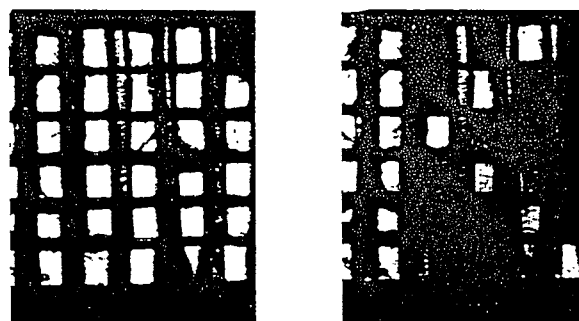


図5. 面型素子の消光特性



(a) 無電圧時のTV映像 (b) 電圧印加時の映像 (V=-7V)

図6. 7λ-光変調器での文字画像出力

表1. 作製した各種の光変調器の特性

型	用途	変調	構造	消光比および性能	動作速度	
導波路	光通信	強度	平板型	35 dB (電圧変化: 4 V)	-	
			高速型	10 dB (5 V)	4.6 GHz	
面型	情報処理用	位相	平板型	136度の光位相変化 (5 V)	-	
			並列	電子数	単体	4.1 dB (5.5 V)
		変化型	アレー	単体素子を99素子(9行11列)2次元配列		-
		電界効果型	単体	10 dB (7.5 V)	1.5 MHz	
			アレー	単体素子を36素子(6行6列)2次元配列 「K」という文字画像の表示		750 KHz
		光-光制御	並列回路	3mWの制御光で出力光が2倍に増加		-
直列回路	0.6mWの制御光で出力光が1/4に減少		-			

学位論文の審査結果の要旨

平成8年11月25日に第1回学位論文審査委員会を開催、平成9年2月3日に口頭発表と最終審査委員会を開催し、以下の通り判定した。

研究歴と学力： 昭和58年3月に徳島大学大学院工学研究科電子工学専攻を修了し、日本電気(株)の研究所勤務を経て、昭和62年4月より本学工学部の助手として研究に従事して来た。研究内容には基礎物理現象の理論解析も含み、英文での発表論文が多く、国際会議での発表経験もあることから、博士課程修了者と同等またはそれ以上の学力を有するものと判定した。

論文： 本論文は、光通信および光情報処理システムの発展を目的とした半導体光変調器の開発を示したものである。半導体pn接合での電子空乏化による光吸収の制御を独自に発案し、導波路型構造と面型構造の両者を開発した。面型構造については、波層成長法により40層以上の多層構造を作製し、2次元アレー状に集積化した。また、動作原理については 1) 電子数変化, 2) 不純物原子へのスクリーニング効果の変化, 3) 電界効果の3種による複合効果を想定して解析し、最適な層圧や不純物濃度などを定める設計理論も作った。さらに非線型の電子の散乱過程を導入し、電子吸収端特性についての新理論も作った。

本研究は、高度な学力と実験技術を背景に遂行され、その成果は光エレクトロニクスのさらなる発展に貢献する事が期待され、博士（工学）論文に値するものと判定した。