

最近の技術から

半導体量子井戸構造の光非線形現象

山西 正道

広島大学工学部電子物性講座 〒724 東広島市西条町下見

半導体、とくに量子井戸構造と呼ばれる人工的な超構造における光非線形現象に関して、最近、いくつかの進展が見られた。ここでは、とくに、この一、二年の間に大きな発展のあった、電界印加状態にある量子井戸構造の実励起キャリアによる電界スクリーニングによる光非線形効果および量子井戸構造の仮想励起キャリアによる超高速・光非線形効果について概説する。

1. 実励起キャリアによる光非線形

一般に、多重量子井戸構造 (MQW) では、キャリアの閉じ込め効果のため、励起子の結合エネルギーが増大し、室温においても明確な励起子吸収ピークが観測される。したがって、光吸収端近傍で、励起子吸収の飽和 (phase space filling) による比較的強い三次の光非線形効果が観測されている¹⁾。この光非線形性をさらに増大させるため、ドーピング超格子 (nipi 構造) と MQW 構造を組み合わせた構造 (nipi-MQW) の光非線形性が検討された^{2,3)}。この構造では、図 1 に示すように、光励起キャリアによる分極が、nipi 構造内の不純物による作りつけ電界 (built-in field) を打ち消し、その結果、MQW 構造に加わる電界は低下する。こうした電界の減少は、励起子吸収ピークのブルー・シフトおよび振動子強度の増大をもたらす。以上のような光吸収をもとにした実励起キャリアの生成による光非線形性は、吸収形・分散形効果に対して、おのおの、単位体積当り一對の電子・正孔が光励起された場合に生じる光吸収係数の変化 σ_{eh} および屈折率変化 n_{eh} を用いて評価される。たとえば、 σ_{eh} は、一定の入射光パワー密度 I_p により定常的に生じた吸収係数の変化 $\Delta\alpha$ と光励起キャリア密度の比として与えられる。

$$\sigma_{eh} = \Delta\alpha / N_0 = \Delta\alpha / \alpha I_p \cdot \tau \cdot (\hbar\omega_p)^{-1}$$

つまり、この種の性能指数には、非線形定数のみならず、媒質の光吸収係数 α および応答時間 τ が含まれており、光双安定デバイス等の光論理デバイスを構成した場合のスイッチングエネルギーは、この性能指数によっ

て決まる。GaAs/AlGaAs 系材料の nipi-MQW 構造の $\sigma_{eh}(\text{cm}^2)$ および $n_{eh}(\text{cm}^3)$ は、おのおの、 $7 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ および $7 \times 10^{-18} \text{ cm}^3$ と報告されており²⁾、これらの値は、通常の MQW 構造の励起子吸収飽和による性能指数¹⁾の 10 倍程度となっている。また、これらの性能指数は、半導体材料に対する室温での値としては、最大のものである。応用上の一つの問題点は、キャリア寿命で決まる応答時間が、10 ms 以上と極度に長い点である²⁾。今後、キャリア寿命時間の制御が問題となろう。

2. 仮想励起キャリアによる超高速光非線形

液体窒素温度以下の低温で GaAs/GaAlAs MQW 構造を励起子吸収ピーク以下の光子エネルギーをもつパルス (パルス幅～数百フェムト秒) でポンプすると、同じく数百フェムト秒のプロープ光に対する光吸収 (図では透過スペクトル) は、図 2 に示すような時間変化をする⁴⁾。すなわち、ポンプ光入射前の吸収 (透過) スペクトル (実線) に比較して、ポンプとプロープ・パルスが同期した場合 (点線) には、二種類の励起子吸収ピークは短波長側にシフトし、同時に、吸収飽和が見られる。また、ポンプ光通過後の吸収スペクトル (破線) は、ポンプ光入射前の状態にほとんど回復している。すなわち、観測された現象は、その回復時間が、ピコ秒程度のきわめて高速のものである。しかし、一方で、非共鳴光により仮想的にキャリアを励起する効率は、実励起のそれと比べると小さいため、上述のような非線形効果の観測に必要なポンプ光パワー密度はかなり大きくなる。たとえば、離調エネルギー $E_{ex} - \hbar\omega_p = 30 \text{ meV}$ で、ポンプ光パワー密度 $I_p = 8 \text{ MW/cm}^2$ のとき、励起子ピークのブルー・シフト量、0.2 meV が報告されている⁵⁾。それでも、そのスイッチ時間の短さは、光論理素子への応用上きわめて魅力的で、実際に、MQW 構造をファブリー・ペロー・エタロン中に置いた構造で、150 K にて、サブ・ピコ秒の応答時間の光ゲート機能が確認されている⁶⁾。以上のような仮想励起子と光の電場の非線形相互作用に起因す

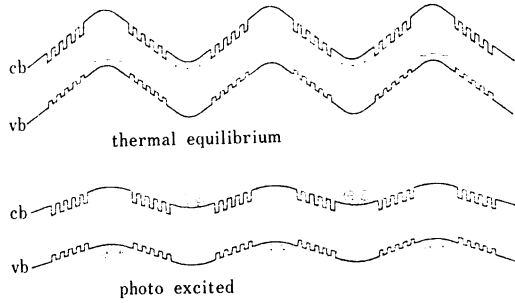


図1 MQW構造を*i*層中に含む nipi構造のエネルギーバンド図
(a)熱平衡状態, (b)光励起キャリアによる分極電荷がある場合のバンド図²⁾

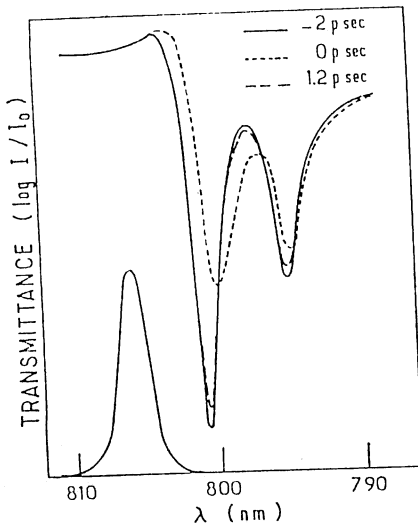


図2 GaAs/GaAlAs MQW構造に対するポンプパルス光のスペクトルおよびプローブ光の透過スペクトルの時間変化⁴⁾
プローブ・パルスが、ポンプ・パルスに対して、2 ps 先に入射した場合(点線)、同期した場合(実線)、1.2 ps 遅れて入射した場合(破線)のプローブ光の透過スペクトルである。
測定温度は 15 K.

る励起ギャップのブルー・シフトは、光シュタルク効果または、ACシュタルク効果と呼ばれている⁷⁾。

こうした仮想励起子を非対称なポテンシャル分布をもつ QW 構造内に生成すると、2次(仮想電荷分極による内部電界変調、第2高調波発生)および3次の超高速光非線形過程が期待される⁸⁻¹⁰⁾。この過程では仮想電荷の生成が本質的に重要な役割を果たすので、virtual charge-induced optical nonlinearity: VCON と名づけ

られた⁹⁾。ごく最近、VCON過程に関連する実験的な試み¹¹⁾がなされたが、まだ非常に初期の段階にあり、今後の実験的な展開を待って、初めて本非線形過程の評価が定まるであろう。

3. ま と め

以上、半導体量子井戸構造の光非線形効果について、最近の進歩を概観した。応用の観点から総じて言えば、これら非線形過程は、帯に短し、襷に長しの感がある。すなわち、実励起過程の場合は、非線形効果は大きいものの応答時間があまりにも長い。一方、仮想励起過程の場合は、逆に、十分短い応答時間が期待されるものの非線形効果は、あまりにも弱い。こうした意味で、この両者の中間的な特性が予期される非線形過程(共鳴トンネル効果と MQW の電界効果の組合せ¹²⁾、あるいは、MQW 構造内での実励起キャリアによる電界スクリーニングを利用した自己正帰還機構¹³⁾に、より大きな期待が集まるであろう。

文 献

- 1) W. H. Knox, R. L. Fork, M. C. Donner, D. A. B. Miller, D. S. Chemla, C. V. Shank, A. C. Gossard and W. Wiegmann: Phys. Rev. Lett., **54** (1985) 1306.
- 2) 安藤弘明, 岩村英俊, 大橋弘美, 神戸 宏: 電子情報通信学会技術報告, OQE 88-35 (1986).
- 3) A. Kost, E. Garmire, A. Danner and P. D. Dapkus: Appl. Phys. Lett., **52** (1988) 637.
- 4) A. Mysyrowicz, D. Hulin, A. Antonetti, A. Migus, W. T. Masselink and H. Morkoc: Phys. Rev. Lett., **56** (1986) 2748.
- 5) A. Von Lehmen, D. S. Chemla, J. E. Zucker and J. P. Heritage: Opt. Lett., **11** (1986) 609.
- 6) D. Hulin, A. Mysyrowicz, A. Antonetti, A. Migus, W. T. Masselink and H. Morkoc: Appl. Phys. Lett., **49** (1986) 749.
- 7) S. Schmitt-Rink and D. S. Chemla: Phys. Rev. Lett., **57** (1986) 2752.
- 8) M. Yamanishi: Phys. Rev. Lett., **59** (1987) 1014.
- 9) D. S. Chemla, D. A. B. Miller and Schmitt-Rink: Phys. Rev. Lett., **59** (1987) 1018.
- 10) VCON 過程の詳細について。たとえば、山西正道: 日本物理学会誌, **44** (1989) 40.
- 11) H. Q. Le, J. V. Hryniewicz, W. D. Goodhue and V. A. Mims: Opt. Lett., **13** (1988) 859.
- 12) H. Sakaki, H. Kurata and M. Yamanishi: Electron. Lett., **24** (1988) 1.
- 13) M. Yamanishi, Y. Lee and I. Suemune: Optoelectron. Devices Technol., **2** (1987) 45; 舟橋陽一, 小畑勝弘, 阪田康隆, 菅 康夫, 山西正道, 山岡慶文, 末宗幾夫: 第36回春季応用物理学会関係連合講演会, 2p-PB-7 (1989).

(1989年1月28日受理)