

令和 3 年 5 月 20 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15036

研究課題名(和文) テラヘルツ波指向性制御デバイスの実現に向けた液晶素子の理想構造の提案と作製

研究課題名(英文) Proposal of the ideal structures of terahertz phase shifter based on liquid crystals toward practical applications

研究代表者

井上 曜 (Inoue, Yo)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・電気情報学群
・准教授

研究者番号：30723770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、液晶を用いたテラヘルツ移相器の実現を目的とした研究であり、次世代高速無線通信技術の根幹を担う技術の開発に寄与することが期待される。テラヘルツ液晶移相器は、電界により連続的で大きな位相制御が可能でメリットがあるが、スイッチングの応答速度の遅さに重大な課題を持っている。そこで、本研究ではポリマー液晶混合系で得られる高速な局所的分子運動を利用する手法と、螺旋液晶の高速応答成分を利用する二つの改善手法を提案した。その結果、双方の手法において、数十ミリ秒の短い応答時間と数十度程度の位相変化量を同時に達成することに成功し、テラヘルツ液晶移相器として実用化に耐えうる技術レベルを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波と光の境界の周波数領域に相当するテラヘルツ波(0.1 THz～10 THz)は、従来から無線通信に用いられてきたミリ波・マイクロ波などの電波に比べてより高周波であり、一度に多くの情報を伝達できるため、無線通信の高速化が可能である。このため、テラヘルツ波は第6世代の高速無線通信技術に利用される帯域として期待されており、ミリ波・マイクロ波帯で用いられるようなフェーズドアレイ法の実現が望まれている。そのような中、液晶を用いたテラヘルツ移相器は重要な研究テーマとなっている。本研究では、大きな位相変化量と高速応答性を両立することに成功し、テラヘルツ液晶移相器の実用化に向けて大きく前進した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the possibility of demonstration of terahertz phase shifters based on liquid crystals is investigated. The terahertz phase shifter is expected to contribute to phased array antennas at terahertz frequency for the next-generation high speed wireless communication technology. Terahertz phase shifters using liquid crystal have advantages in the continuous and large phase shift by electricity, while a significant problem on switching response times. Here, I propose two methods that use the fast movement of liquid crystal molecules localized in polymer structures, and that use the fast response components of helical structures of cholesteric liquid crystals. As a results, a short response time on the order of several tens of milliseconds and a sufficiently large phase shift greater than 30 degrees was demonstrated in both methods, which can possibly be used in practical applications.

研究分野：液晶デバイス

キーワード：テラヘルツ 液晶 移相器

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波は第 6 世代の高速無線通信技術に利用される帯域として期待されており、ミリ波・マイクロ波帯で用いられるようなフェーズドアレイ法の実現が望まれている。このような需要に従い、液晶を用いたテラヘルツ波の位相遅延デバイス(移相器)はフェーズドアレイ法の実現に向けて重要な研究テーマとなっている。

透過型素子を用いて電磁波の位相を操る場合、電磁波の波長と同程度の液晶セル厚が必要となる。テラヘルツの場合、数百ミクロン以上の極厚な液晶セルが必要となり、従来とは異なる配向技術の開発やダイナミクスの利用が重要となる。特に、セル厚の二乗に比例して大きくなる電気光学効果の応答時間の問題は、致命的なまでの実用上の欠点を持つため、改善が急がれる。

2. 研究の目的

本研究課題では、極厚な液晶素子の高速応答化に関して、二つの手法を提案し、改善を狙った。

一つ目は、ポリマー/液晶混合系を利用したものである。ポリマー内部に閉じ込められた液晶は、セル厚ではなく閉じ込められた空間のサイズに依存した応答特性を示す。このため、ポリマー形状、及び液晶ドロップレットのサイズを制御することができれば、応答時間の劇的な改善が見込まれる。二つ目は、ネマティック液晶とは根本的にダイナミクスの異なるコレステリック液晶を用いる方法である。コレステリック液晶の螺旋軸に垂直な電界を印加した場合、セル厚ではなく螺旋ピッチに依存した性質を示す高速応答成分が現れる。これは、極厚な液晶素子という条件下においても高速な電気光学効果が利用できるということであり、テラヘルツ液晶移相器への応用に適していると考えられる。以下では、これら二つの高速応答化の手法に関する研究成果について簡潔に記す。

3. 研究方法

二つの高速化手法について、以下にそれぞれの方法を記す。

(1) ポリマー/液晶混合系を利用した高速化手法

テラヘルツ液晶移相器として望まれる性能は位相変化量が大きく、応答時間が短いという特性である。これをポリマー/液晶混合系で実現する場合、ポリマー濃度は薄くする(液晶濃度を濃くする)ことで大きな位相変化量が期待され、液晶ドロップレットのサイズをある程度小さくすることで応答時間の短縮を見込める。従来から存在するポリマー分散型液晶(PDLC)の技術体系では、等方性モノマー(NOA シリーズ)が液晶を溶かすために 50%程度以上の濃度を必要とする場合が多く、前者の条件を満たすことができない。そこで、我々は液晶モノマーと液晶の混合系の光重合相分離を利用することで、10%以下のモノマー濃度であるにもかかわらず、PDLC のような構造を作製することが可能な技術を開発した。

(2) コレステリック液晶を利用した高速化手法

コレステリック液晶の螺旋軸に垂直な電界を印加した時、三つの変形が引き起こされる。すなわち、(i)フレクソエレクトリック効果、(ii)螺旋変歪、及び(iii)螺旋ピッチの増加に伴う螺旋変歪の三つである[2,3]。このうち、ミクロな分子再配向だけを必要とする (i)及び(ii)は非常に高速な応答成分であり、セル厚には無依存で螺旋周期の二乗に比例して応答時間が増加する。(i)に関しては多くの研究論文が発表されておりすでによく知られた話であるが、一方で(ii)に関しては近年我々が見出した高速応答成分であるため、その性質は詳しくわかっていなかった。本研究では、螺旋変歪の成分のみが支配的な成分として現れるような系(プラナー配向コレステリック液晶に横電界を印加する構造)を利用し、その特性を詳細に調べた。さらに、その素子構造を用いて、実際にテラヘルツ移相器として動作させたときの特性を測定した。

4. 研究成果

上述の二つの高速応答化の手法に関する研究の実施例を以下に記す。

(1) ポリマー/液晶混合系を利用した高速化手法

図 1 は 9:1 の比率で混合された液晶モノマー/液晶混合系を光重合相分離させることで形成したポリマー構造を、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した写真である。使用された液晶モノマー/液晶混合系は液晶層-等方相相転移温度が $59.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。図 1(a)を見ると、 $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下の温度においては非常に細密なポリマー構造が形成されたが、一方で相転移温度近傍である $59.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ においては一桁以上大きな空孔(液晶ドロップレットが抜けた穴)サイズが観察された。画像から算出された平均液滴サイズは $3.3\text{ }\mu\text{m}$ であった。相転移温度以上の重合温度で作製されたポリマー構造は数珠上の形状を示し、数百ミクロン程度の空孔を持つ細密な構造が形成された。 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、 $59.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ において重合された素子が非常に特徴的であることがわかる。さらに、図 1(b)に重合温度を $59.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ に固定して、ポリマー濃度を変化させたときの SEM 像を示した。ポリマー濃度 7%までは蜂の巣のような構造が形成されたが、5%以下ではその構造が維持できなかった。この蜂の巣のような相分離構造体は、厚い液晶素子という条件下においても駆動電圧と応答速度の両立を実現することが期待される。そこで、実際に $700\text{ }\mu\text{m}$ という厚い液晶素子を作製し、 0.75 mm (周波数 400 GHz)の波長を有するテラヘルツ波を照射することで、位相変化量(図 2)と応答時間(図 3)を測定した。 $7, 9, 10\text{ wt\%}$ の三つのポリマー濃度のうち、 7 wt\% の濃度において最も位相変化量が大きく、最大で 30 度 に達した。一方で、どのポリマー濃度においても数十ミリ秒程度の応答時間が得られた。この応答時間は、従来技術に比べて 2 桁以上の高速化が実現されている。これらの結果から、蜂の巣構造を有するポリマー液晶複合系は、テラヘルツ波の移相器として働き、大きな位相変化量を維持したまま従来からの課題であった応答時間の問題を解決した。

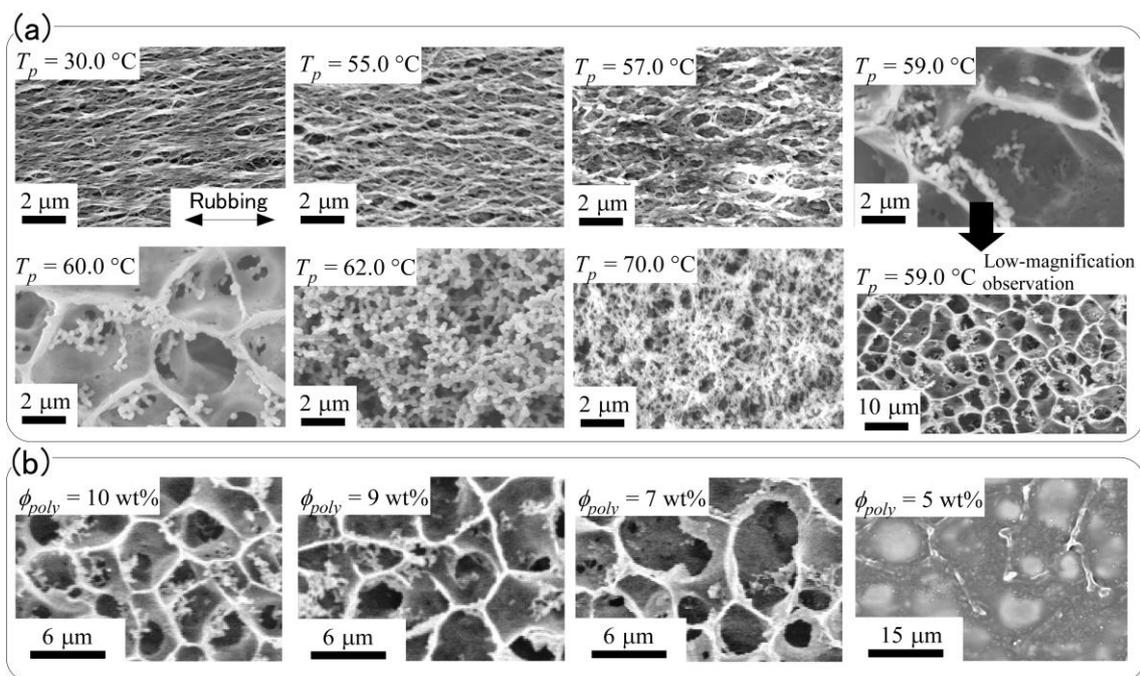


図 1 ポリマー構造の SEM 像 : (a)重合温度依存性、(b)ポリマー濃度依存性(重合温度 $59.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

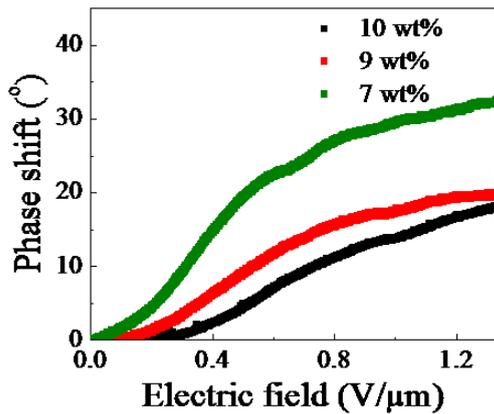


図2 位相変化量の電界依存性

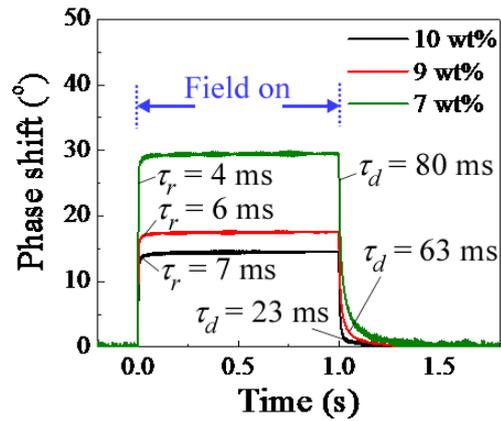


図3 応答波形

関連論文 Yo Inoue et al., *Macromol. Mater. Eng.*, 304 (2019) 1800766.

(2) コレステリック液晶を利用した高速化手法

図4は螺旋変歪の応答成分のみ検出できる測定系を用いて、螺旋変歪に関する応答特性を詳細に調べた実験結果である。縦軸は立ち上がり時間で示しているが、この応答成分では立ち上がり時間と立ち下り時間は同じであるため、どちらでプロットしてもグラフに差異はない。図4(a)を見ると、螺旋ピッチの増加に伴って立ち上がり時間が増加していることが分かる。一方で、図4(b)からは、セル厚が変化しても応答時間は全く変化しないことがわかる。このように、コレステリック液晶の螺旋変歪のダイナミクスは極厚な液晶素子を必要とするテラヘルツ液晶移相器に適していると考えられ、高速移相器の実現が期待される。そこで、図5に示すような測定系において、実際にテラヘルツ波を照射し、その位相変化量を調べた。この時、テラヘルツ波は素子の横方向から入射し、デバイス長5mmの液晶層を伝搬させた。また、横方向に電界を印加するために銅電極を左右に配置し、入射テラヘルツ波の偏光方向と螺旋軸が垂直となるようにした。測定結果の応答波形を図6に示す。図中の E_c は螺旋消失電界を示す。応答時間は電界強度 $E = 0.86 E_c$ 以下において、約20msの短い応答時間を示した。また、このとき、位相変化量80度以上を達成し、大きな位相変化量と高速応答性を両立した。

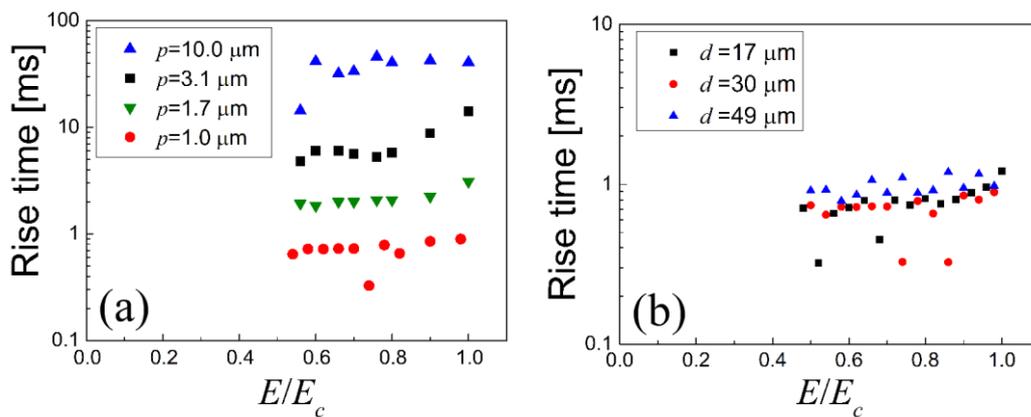


図4 応答時間：(a) 螺旋周期依存性、及び(b)セル厚依存性

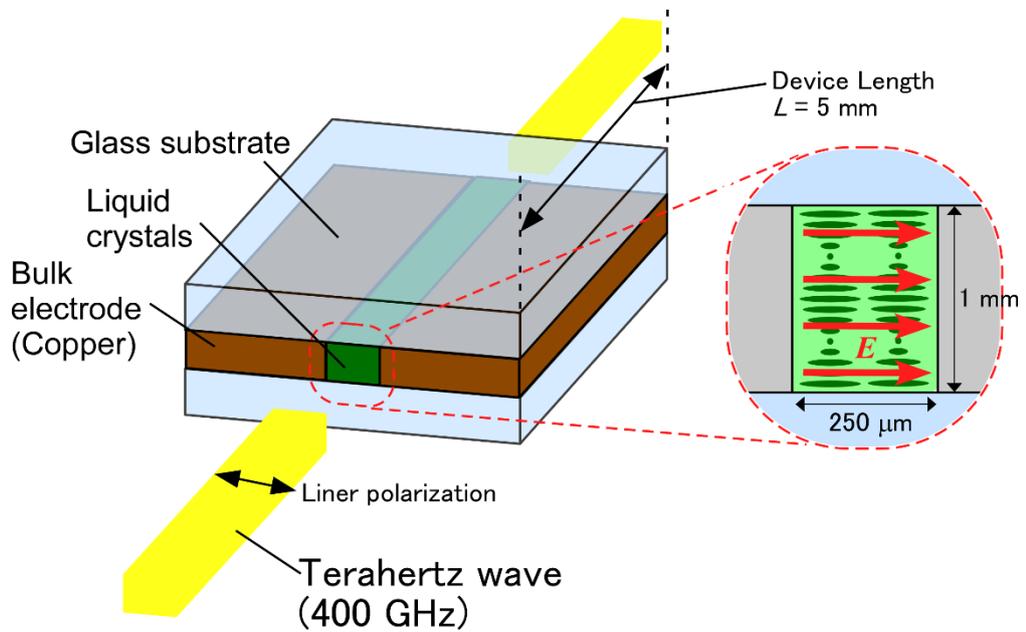


図5 テラヘルツ測定系

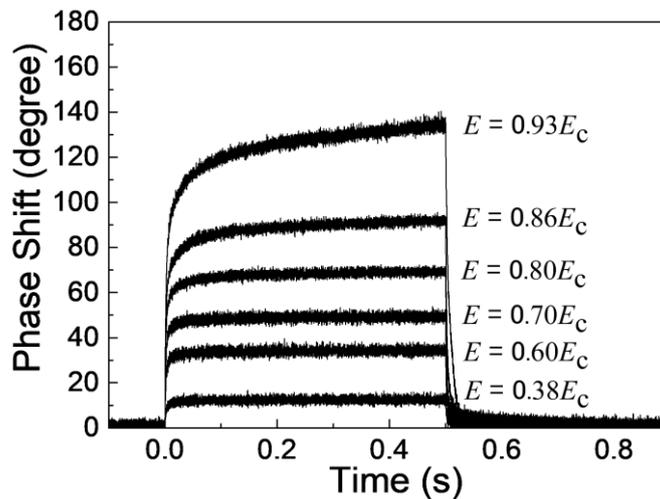


図6 応答波形

関連学会発表： 井上曜 (招待講演 2106, 2020年10月30日)

「極厚な液晶素子の高速応答化に関する二つの戦略：テラヘルツ液晶移相器の応用に向けて」
2020年日本液晶学会オンライン研究発表会 オンライン開催 2020年10月29~30日

研究成果のまとめ：

厚い液晶素子条件下における二つの高速応答化の手法を提案し、位相変化量と高速性を両立することに成功した。

ポリマー液晶混合系を利用する方法では、10 wt%以下という低濃度ポリマー条件下であるにもかかわらず、PDLCのような蜂の巣構造を形成することに成功し、局所的に閉じ込められた液晶は、厚い素子条件下においても高速性を示した。一方で、液晶ドロプレットのサイズは数ミクロンと大きく、混合系における液晶液滴濃度も90 wt%以上であることから、30度の大きな位相変化量を実現することができた。

コレステリック液晶の螺旋の運動を利用した手法においては、セル厚に無依存な高速な運動成分を意図的に抽出することで、高速応答を実現した。さらに、液晶素子の横方向からテラヘルツ波を照射することで、伝搬距離を長くとり、移相器として大きな位相変化量を維持したまま従来技術に比べて2~3桁短い応答時間を達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Inoue Yo, Sasaki Shunta, Moritake Hiroshi	4. 巻 127
2. 論文標題 High-quality tuning of cholesteric liquid crystal lasers based on polymer composite system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 083104 ~ 083104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5136048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Lang Trong Nghia, Bui Van Bao, Inoue Yo, Moritake Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Response Improvement of Liquid Crystal-Loaded NRD Waveguide Type Terahertz Variable Phase Shifter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 307 ~ 307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst10040307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Inoue Yo, Moritake Hiroshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Lasing stability of quasi-CW driven cholesteric liquid crystal lasers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 052006 ~ 052006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab864f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nghia Lang Trong, Inoue Yo, Moritake Hiroshi	4. 巻 141
2. 論文標題 Electric Field Distribution Analysis and Response Improvement of Liquid Crystal-loaded NRD Waveguide Type Terahertz Phase Shifter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 220 ~ 225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.141.220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井上曜、久保等、鹿田建普、森武洋
2. 発表標題 蜂の巣構造を有する高分子分散型液晶を用いた高速テラヘルツ移相器
3. 学会等名 日本液晶学会討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lang Trong Nghia、井上曜、森武洋
2. 発表標題 配向ナノファイバー / 液晶複合体装荷NRDガイド型テラヘルツ波可変移相器の応答改善
3. 学会等名 日本液晶学会討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上曜、佐々木 駿太、森武洋
2. 発表標題 液晶 / 高分子複合系を用いた高効率・波長可変レーザー
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Lang Trong Nghia、井上曜、森武洋
2. 発表標題 配向ナノファイバー / 液晶複合体装荷NRDガイド型テラヘルツ波可変移相器の応答改善
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上曜
2. 発表標題 極厚な液晶素子の高速応答化に関する二つの戦略：テラヘルツ液晶移相器の応用に向けて
3. 学会等名 2020年日本液晶学会オンライン研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上曜、森武洋
2. 発表標題 擬似CW発振条件下におけるコレステリック液晶レーザーの出力安定性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------