

論文の内容の要旨

論文題目 ニオブ酸リチウム結晶への分極反転ドメインの作製と
分極反転ドメインを利用した光学デバイスの研究

氏名 山 田 正 裕

近年、インターネットの普及が爆発的に進み、それに伴い、社会・経済が大きく変化する情報通信革命（IT革命）と言われている社会現象が進行している。IT革命において光技術の果たしている役割は、例えば、半導体レーザー・光ファイバー・光変調器や身近な例としてCD・DVDなどの光ディスクなどを見てもわかるように極めて大きいものがある。光技術を今後とも大きく発展させていくためには、それを支える関連光学材料や光学部品の研究開発を強力に推進することが極めて重要である。中でも、非線形光学効果を利用した非線形光学デバイスは、今後とも光技術の発展を支えて行くものとして大いに期待されている。

非線形光学デバイスにおいては、利用する光学材料からそのデバイスの目的に合致した非線形光学効果をいかに有効に引き出すかがポイントとなるが、疑似位相整合（QPM: Quasi-Phase-Matching）という技術を利用すれば、非線形光学結晶中の非線形光学定数の符号を最適に設計することで様々な非線形光学デバイスを実現することができる。材料となる非線形光学結晶としてはいくつかあるが、中でもニオブ酸リチウムは大きな非線形光学定数を有し極めて優れた材料である。このため、ニオブ

酸リチウムを利用した疑似位相整合デバイスの研究が大変活発に行われている。

ニオブ酸リチウム結晶中の非線形光学定数の符号を操作するには、結晶中に分極反転ドメインを形成する方法が知られているが、優れたデバイスを実現するためには、優れた形状の分極反転ドメインを形成することが非常に重要である。このため、本研究以前から、ドメイン形成法をめぐる競争が繰り広げられていた。

そうした状況の中、本研究では、外部電場を利用したニオブ酸リチウム結晶中への分極反転ドメイン形成の検討を進めた。そして、図 1 に示すような極めて優れた形状の分極反転ドメインを形成する方法を編み出すことに成功した。

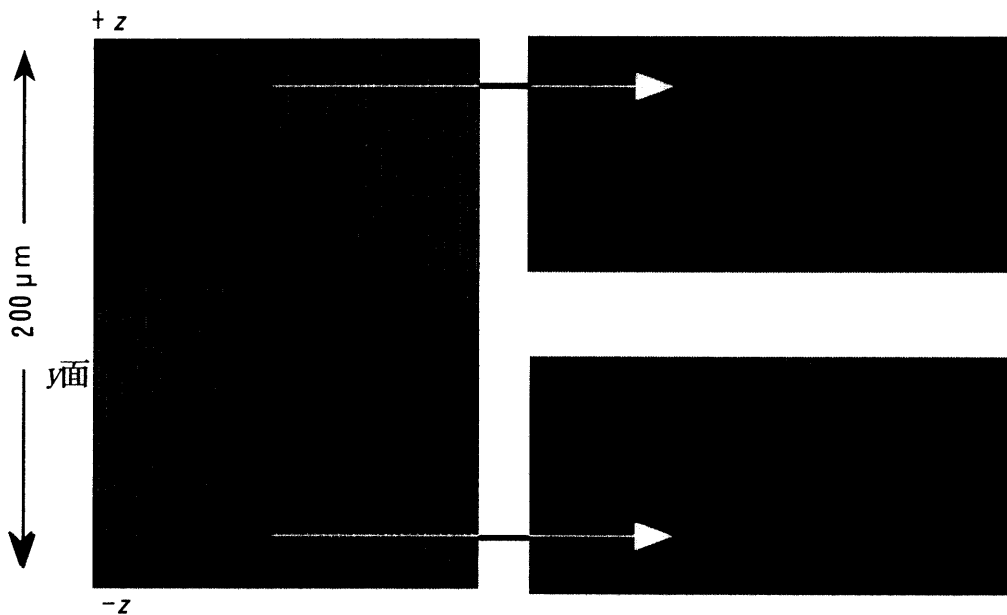


図 1 ニオブ酸リチウム結晶中に形成された微細な周期分極反転構造。写真は結晶の断面（y-面）の様子を示す。周期分極反転構造の周期は $2.9\mu\text{m}$ 。分極反転ドメインを可視化するために切断した結晶断面を鏡面研磨後にフッ酸を用いてエッチング処理している。

この方法により、それまで大変活発に展開されていた分極反転ドメイン形成法に関する競争に終止符が打たれた。そして、この技術はその後のドメインエンジニアリングの分野を開拓することに大きく貢献した。

それまでの方法で形成された分極反転ドメインは、結晶の表面付近にしか形成されず、また微細なドメインを形成することができなかつたために光導波路デバイスなど結晶の表面付近しか利用しないデバイス応用に限定されていた。また、微細なドメインが形成できなかつたため、デバイスの持つ非線形光学効果を最大限に活用することができないでいた。

本研究では、外部電場による分極反転ドメインの作製方法として、電子線照射による方法と直接電場印加による方法の検討を行った。

電子線照射による分極反転ドメインの作製方法は、ニオブ酸リチウム結晶の-z面に加速した電子線を照射する方法で、電子線を照射した領域に分極反転ドメインが形成される。この方法によって、初めて結晶表面に垂直なドメイン壁を有し結晶基板の厚さと同程度まで深い極めて理想的な分極反転ドメインを形成することに成功した。ただ、この方法には、生産性と再現性に問題があり、我々は、直接外部電場印加による方法の可能性が見いだされた時点でそちらの検討に移った。しかし、この方法はその後本研究以外でも改良が加えられ特殊なタイプのニオブ酸リチウムへ結晶への分極反転ドメインの形成に利用され、今日に至っている。

直接外部電場印加による方法は、結晶基板の対向する両表面に形成された電極間に電圧を印加するという極めて簡便な方法である。しかも、1秒以下という極めて短時間で所望の形状の分極反転ドメインを結晶基板中に形成することができる。このように簡便な方法でありながら、電子線を照射して形成されたドメイン形状と同様に極めて理想的な形状を実現することに成功した。このような簡便な方法が本研究の以前に実現しなかったのには理由がある。ニオブ酸リチウム結晶は、frozen ferro-electric crystalと言われていたこともあり、直接外部電場印加による分極反転は不可能であると思われていたのである。事実、通常電圧を印加すると分極反転する前に結晶が絶縁破壊を起こしてしまう。本研究では、結晶基板を薄くすることにより結晶の絶縁破壊を回避するという方法で、分極反転検討の糸口を見つけることができた。そして、検討の結果、微細な層状の周期分極反転構造を形成することに成功した。

また、本研究では、確立した技術を利用して分極反転ドメインを非線形光学デバイスや電気光学デバイスに応用し、今日で言う「ドメインエンジニアリング」分野を開拓またはその草分けを行うことで、この分野

の発展に貢献することができた。

分極反転ドメインの非線形光学デバイスへの応用としては、光第二高調波発生素子 (SHG: Second Harmonic Generator) の開発を行った。デバイスは周期分極反転構造を有するニオブ酸リチウム結晶中に光導波路で形成された導波路型擬似位相整合 SHG であった。開発されたデバイスは、従来よりも 1 桁以上の高性能を実現することができ、このパフォーマンスにより、本研究により確立された方法により作製された周期分極反転構造の優れたポテンシャルを具体的に示すことができ、これによりその後のドメイン作製方法の方向を決定付けることになった。今日では、本研究による直接外部電場印加によるドメイン作製技術が主流となり、各方面において、この技術を利用して上記の第二高調波発生素子だけではなく実に様々な非線形光学デバイスの研究・開発が活発に行われるようになり、大きな成果も得られている。

分極反転ドメインの電気光学デバイスへの応用としては、これまでにない新しい概念のデバイス、即ち、ニオブ酸リチウム結晶中に光偏向器や焦点距離可変レンズなどの光能動機能が作り込まれたデバイスの提案を行い、実際に幾つかのデバイスの開発を行った。光偏向器・焦点距離可変レンズ・電場で誘起するブラッグ反射器がそれであり、基本動作を確認し、また、これらを 1 チップのニオブ酸リチウム結晶基板中に集積したデバイスの開発も行った。中でも、電場で誘起するブラッグ反射素子では光変調器の開発を行い、青紫光を直流から 1 GHz 以上の広帯域な周波数領域にわたって強度変調可能な光変調器の開発に成功した。このデバイスは周期分極反転ドメイン構造で構成された電場で誘起されるブラッグ反射器に変調電場を印加することによって光を強度変調できる従来にはない新しい原理で動作するデバイスである。従来では、青紫光をこのような広帯域な周波数領域にわたって強度変調できる変調器はなかった。開発したデバイスは、ソニーの他社に先駆けた青紫半導体レーザに対応した高密度光ディスクの開発に貢献することができた。

本研究の中で特に分極反転ドメインの作製方法に関する研究は、現在では各方面に大きな広がりを見せており、この技術を利用した様々な光学デバイスの研究開発が活発に進められており、今後の発展が大いに期待されている。