

反転対称性が破れた界面のポッケルス効果による巨大光変調

Giant Optical Modulation due to the Pockels Effect at the Interface Where the Inversion Symmetry is Broken

H31助自3

代表研究者 徳 永 英 司 東京理科大学 理学部 第一部物理学科 教授

Eiji Tokunaga

Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Tokyo University of Science

As written in the textbook of nonlinear optics, it is necessary that the spatial inversion symmetry of the system is broken in order for the Pockels effect to occur. An interface between two different materials satisfies this condition, but the relevant volume is limited to a range of nm distance from the interface. The Pockels effect of interfacial water on a transparent electrode was first reported in 2007, and the Pockels coefficient (proportionality coefficient of refractive index change proportional to the electric field) has been reported to be an order of magnitude larger than that of LiNbO_3 . However, only a slight phase change occurs in the light which is propagated through the extremely thin interfacial water layer, so that only a 1/1000 change in the transmitted light intensity has been extracted as intensity modulation. In this research, we have realized that light intensity modulation as large as 50% is experimentally attained by total reflection of light at electrode-water interface, using a commercially available transparent electrode on a glass substrate immersed in an aqueous electrolyte solution and applying an AC voltage of several volts against a counter electrode. The principle of signal enhancement nearly 1000 times can be explained by the resonator effect (coherent perfect absorption) in a transparent electrode thin film with a thickness on the order of the wavelength of light and the penetration of evanescent light into the electric double layer in water due to total reflection. The experimental results are quantitatively reproduced by theoretical calculation of the optical response of the multilayer film, and it is shown that 100% modulation can be realized under optimized conditions. Our finding will make it feasible to develop light modulation elements or interfacial sensors using water. The signal enhancement principle opens the possibility of using the interfacial Pockels effect ubiquitous for any interface.

研究目的

光を電気信号で変調する素子は、光通信で実用化されている固体ポッケルス結晶 LiNbO_3 （ポッケルス効果：印加電場の1乗に比例する屈折率変化を利用）と、ディスプレイで実用化されている液晶（電場の2乗で応答する複屈折率変化を利用）のほかに、Si光変調器やプラズ

モン変調器、グラフェン変調器などが研究・開発されている。これらはすべて固体のバルク（3次元体積）の性質（グラフェンは1原子層物質なので微妙、プラズモンは界面に局在するがバルクのポッケルス素子の援用が必要）を利用するもので、反転対称性が破れた界面のポッケルス効果を利用する電気光学素子は存在しない。本研究では、バルクではポッケルス効果

を示さない材料の界面のポッケルス効果を利用した初めての光変調素子を開発し、その応用分野を開拓する。界面として固体(電極)-液体の界面を利用することが中心になるが、液体-液体、液体-気体、固体-気体、固体-固体の界面についても検討する。同時に、さまざまな材料や溶媒の組み合わせを試すことで、巨大な界面水のポッケルス効果の発現メカニズムの解明を目指す。

にし、信号増強の原理はあらゆる界面に遍在する界面ポッケルス効果を使用する可能性を開く。加えて、新たな透明電極材料、金属-透明電極界面、新たな電極材料(貴金属でない金属や半金属)について界面ポッケルス効果の研究を開始した。

ー 以下割愛 ー

概 要

非線形光学の教科書に書かれているように、ポッケルス効果が発生するためには、系の空間反転対称性が破られている必要がある。2つの異なる材料間の界面はこの条件を満たすが、関連する体積は界面からnmの距離の範囲に制限される。透明電極に対する界面水のポッケルス効果は2007年に最初に報告され、ポッケルス係数(電界に比例する屈折率変化の比例係数)は LiNbO_3 よりも1桁大きいと報告されている。しかし、非常に薄い界面水層を伝搬する光にはわずかな位相変化しか生じないため、透過光強度の1/1000の変化のみが強度変調として抽出されていた。本研究では、電解質水溶液に浸したガラス基板上に市販の透明電極を使用し、対極に対して数ボルトのAC電圧を印加することにより、電極-水界面での光の全反射によって50%もの光強度変調を実験的に達成した。1000倍近くの信号増強の原理は、光の波長のオーダーの厚さの透明電極薄膜の共振器効果(コヒーレント完全吸収)と全反射による水中の電気二重層へのエバネセント光の浸透によって説明できる。多層膜の光学応答の理論計算により実験結果を定量的に再現し、最適化された条件下で100%の変調を実現できることを示した。この研究結果は水を使用した光変調素子または界面センサーの開発を可能