

超音波 技術과 應用

金 周 弘

東國大學校, 電子工學科 教授

可聽周波數보다 높은 周波數를 가진 音波를 超音波라 하며 水中 通信, 魚探機, 探傷器等 通信及 計測分野의 應用과 加工機, 洗淨, 溶接, 運用等的 動力의 應用分野로 2分되며 物理化學, 電氣, 機械, 金屬, 醫學, 生物等的 모든 分野에 널리 利用되고 있다.

여기서는 超音波의 應用을 爲한 基礎知識과 動力의 應用에 關하여 概說하고 近來脚光을 받은 超高周波 超音波 技術을 소개하려고 한다.

1. 超音波의 性質과 空胴現象

可聽音波의 上限인 20kHz以上の 振動數를 가진 音波를 超音波라고 하나 그 以下の 振動數를 가진 音波에서도 人間の 귀로 듣는것을 目的으로 하지 않는 音波를 超音波로 取扱하는 경우가 있다. 例를 들면 1~10kHz를 使用한 媒煙의 集塵裝置와 粉體藥品이나 粉體食品의 水分乾燥裝置를 超音波集塵機, 超音波乾燥機라 稱하고 있다.

超音波는 音波와 本質의 同으로 같으며 物體의 振動인 彈性波이며 疎密波다. 氣體와 液體中에서는 媒質이 剛性을 갖지 않으므로 縱波뿐이지만 固體媒質內에서는 縱波와 橫波의 2種이 있다

波動現象에 있어 超音波는 電磁波와 同一한 波動方程式 $\nabla^2\phi = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}$ 의 解로 記述되므로 電磁波와 비슷한 波動의 性質을 갖고 있다. 即 波長 λ , 音速 C 및 振動數 f 는 다음의 關係가 成立하며,

$$C = f\lambda$$

$$\text{音速 } C \text{는 } C = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}}$$

에 의하여 주어진다. 여기서 ρ 는 媒質의 密度이며 κ 는 氣體나 液體媒質에서는 體積彈性率이고 固體의 경우는 Young의 彈性率이나 剛性率(이 경우는 橫波)이다. 空氣中の 音速은 表1과 같이 331 m/s(0°C)이며 溫度가 1°C上昇하면 約 0.6m/s 增加한다. 超音波의 波長은 比較的 짧아서 例를 들면 水中에서는 500kHz에서 3mm, 20kHz에서 7.5cm의 波長을 가지므로 보통의 音波에서는 생각치 않았던 問題가 일어난다.

銳利한 指向性; 指向性函數 R 은 d/λ 의 函數로 주어지며 d 는 送受音板의 直徑이고 λ 는 超音波의 波長이므로 波長이 짧은 500kHz나 1MHz의 超音波는 光線과 같이 直進하며 平面波와 振動面과 反射面의 距離가 1/4波長의 奇數倍일때 超音波의 干涉에 依하여 發生한 定在波가 쉽게 얻어지며, 超音波가 到達하지 못한 暗部 即 shadow

表 1.

媒 質	溫 度 (°C)	傳播速度 C (m/s)	密 度 ρ (g/cm ³)	固有impedance ρC
空 氣	0	331	1.23×10^{-3}	41
清 水	0	1,419	1.0	1.41×10^5 (bulk)
海 水	0	1,450	1.02	1.48×10^5
"	15	1,500	1.02	1.53×10^5
유 리		3.4~5.9km	2.5~5.9	$12 \sim 21 \times 10^5$
鋼 鐵		5.81km	7.8	47.6×10^5
水 晶		5.75km	2.65	15.2×10^5
폴리 스티렌 타이렌		2,167km	1.1	2.94×10^5

dow zone이 생기기 쉽다. 이와같은 性質은 水中通信의 경우 即 sonar에서는 S/N比를 높일때 도움이 되고 時空間으로 짧은 펄스를 만들 수 있으므로 PM(pulse modulation)에 有利하나 反面에 超音波의 動力的 利用에서는 不利한 경우도 있다.

反射와 屈折; 媒質의 境界面에서 入射角 θ_1 와 屈折角 θ_2 는 各媒質內的 音速을 C_1, C_2 로 하였을때

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = -\frac{C_2}{C_1}$$

의 關係가 成立한다. 空氣로부터 水中에 들어가는 경우의 臨界角($\theta_2=90^\circ$)은 13.5° 이고 水中으로부터 鋼鐵에 들어갈때는 14.5° 이다. 媒質의 密度 ρ 와 音速 C 의 積으로된 固有 임피던스 ρC 에 의하여 定하여진 超音波의 세기의 透過率은

$$\frac{\text{透過 power}}{\text{入射 power}} = \frac{4\rho_1 C_1 \rho_2 C_2 \cos^2 \theta_1}{(\rho_2 C_2 \cos \theta_1 + \rho_1 C_1 \cos \theta_2)^2}$$

로 주어지며 固有 임피던스의 差가 큰 空氣와 물사이는 거의 透過하지 못하며 물과 polystyren은 約 80%, 물과 유리는 約 20%정도로 power가 透過된다. 特히 ρC 가 물과 같은 고무를 ρC 고무라 칭하고 고무中에 超音波의 減衰가 큰것을 利用하여 超音波 吸收材로 使用한다.

超音波의 세기 I 는 音壓 p 와 粒子速度 v 에서 다음과 같이 表示된다.

$$I = p v = \frac{p^2}{\rho C} = \rho C v^2$$

水中 $1W/cm^2$ 의 세기를 갖인 1MHz의 超音波는 重力加速度 g 의 75,000倍로 計算된다. 이때 發生한 斷熱壓縮에 依하여 局部的으로 數百度($^\circ C$)의 高溫이 瞬間으로 發生하였다가 消滅한다. 그리고 直進波中에는 音의 세기에 比例한 動壓이 發生하여 強力한 경우는 jet流를 形成한다. 이것을 우리는 直進流라고도 한다.

空腔現象(cavitation); 液體中의 強力超音波의 作用에는 cavitation이라는 特異한 現象이 關與되고 있는(경우가 많다).

超音波의 動力分野의 利用의 代價는 이 作用에 의한 것이다. 氣體를 包含한 液體中에 強力超音波(水中에서는 $0.3W/cm^2$, 最大壓力 0.93 Bar以上)를 發生시키면 音壓이 周圍의 靜壓을 넘을때 液體가 팽창하는 過程에서 큰 負壓이 發生하여 眞空部分 即 空腔에 周圍의 液體中에 녹

아있는 氣體를 모이게 하거나 液體를 蒸發시켜서 氣泡를 形成한다. 다음의 壓縮過程에서는 空腔이 急激히 壓縮되어 極히 큰 高壓(數百~數千 氣壓)이 發生하고 이때 發生한 氣泡는 壓縮되어 없어지는 것도 있으나 條件에 따라서는 超音波의 節의 部分에 모여 들어서 큰 氣泡가 되어 液面에 上昇한다. 이러한 現象을 cavitation이라 부르며 그 發生條件과 作用은 다음과 같다.

溶解한 氣體를 脫氣한 狀態에서는 cavitation이 잘 일어나지 않는다. 이상태에서 發生한 것을 蒸氣性 cavitation이라 부른다. 完全脫氣한 液體는 cavitation을 發生시키기 위하여 理論上 500~1000氣壓의 音壓이 必要하다.

cavitation은 20kHz나 28kHz附近에서 가장 잘 일어나며 1MHz附近부터 급격히 發生하기 어려워진다. 周圍壓力 即 靜壓은 2氣壓일때 最大로되며 이보다 크거나 적어지면 cavitation의 세기도 弱하여진다. 周圍溫度는 $70^\circ C$ 前後가 좋으며 液體의 種類는 粘性이 적고 表面張力이 크며 蒸氣壓이 낮고 音速이 클수록 cavitation이 强하게 發生한 것을 實驗으로 알수 있다.

cavitation의 作用은 다음과 같다.

ㄱ) 酸化作用: cavitation에 의하여 氣泡가 나올때 發生期의 酸素O가 發生하고 이것의 强한 酸化作用에 의하여 過酸化水素 H_2O_2 가 생긴다. 한편 空氣中의 窒素와 結合하여 NO가 發生하고 이것이 다시 亞窒酸 HNO_2 으로 된다. 이들은 다시 化合하여 窒酸 HNO_3 로 變化한다. 超音波 適用時間에 對한 變化는 그림 1과같다. 그리고 強力한 超音波가 殺菌作用을 갖는것은 이 酸化力과 強力한 音壓에 의한 破壞力에 起因한 것으로 본다.

ㄴ) 粒子의 集合 및 分散作用:

氣體, 液體, 固體의 粒子가 氣體또는 液體中에 分散되고 있을때 媒質과의 比重과 크기의 差에 의하여 서로 振動速度가 달라서 서로 충돌하여 集合하는 作用과 反面 破壞力에 의하여 分散하는 作用이 있어 超音波의 周波數와 세기의 選定에 따라 이들 粒子의 集合, 沈澱이 可能하며 水中의 石炭粉이나 木炭粉의 回收에 利用되고 있다.

ㄷ) 發熱作用: 超音波는 대단히 큰 壓力振幅

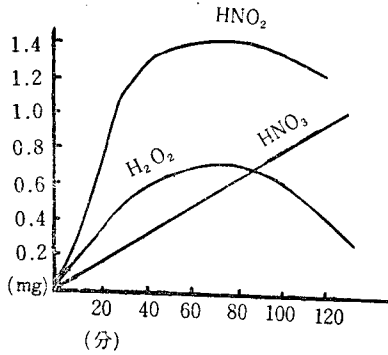


그림 1. 증류수에 超音波를 쪼였을때 HNO₂, H₂O₂, HNO₃의 時間에 따른 發生經過.

을 가지므로 그 壓縮時는 斷熱收縮에 의하여 數百°C의 高溫이 순간적으로 發生하게 되고 이들이 蓄積된다. 특히 金屬棒의 경우는 節部에 局部的으로 加熱된다. 또 媒質이나 物體에 吸收된 超音波 에너지는 終局은 熱로 變化하므로 溫度가 上昇하게 된다.

ㄴ) 攪拌 및 粒子的 破壞作用 :

超音波에 의한 強大한 加速度와 cavitation에 의한 氣泡의 팽창, 收縮에 의하여 媒質中の 粒子가 破壞 또는 攪拌作用을 일으켜 血球나 細菌의 破壞 또는 液體中の 固體, 液體粒子가 破壞 分散되어 乳化作用을 하며 酒類, 香水等의 熟成, 化學反應의 促進等を 한다.

2. 超音波의 發生

· 高周波 發振機에 에너지 變換器를 附着한 裝置로 構成되며 目的에 따라 pulse波와 連續波를 發生한다. 變換器(transducer)는 壓電形에 水晶振動子가 있으며 주로 2MHz以上の 周波數나 高溫(200°C~500°C)에서 利用된다. 이는 impedance가 높아서 高電壓을 加하여야 하므로 電氣絶緣이 어려운點이 短點이다. 電歪形으로는 티탄산 바륨系振動子가 있으며 數10kHz~2MHz에 適合하며 impedance(數10—數100Ω)도 낮고 效率(80%)도 높으며 製品의 形態도 自由로이 製作할 수 있으며 出力은 2~3W/cm²程度이므로 많이 使用되고 있다.

磁歪形은 Ni, 알페로(Al 13%, Fe87%) 및 ferrite의 3種이 있으며 Ni나 알페로는 渦流損失때

문에 30kHz以下에서 使用되며 變換效率은 50% 以下이고 出力은 20W/cm² 정도이다. ferrite는 Ni-Cu系 또는 Co系의 ferrite를 使用하여 成形 燒成한 것으로 20kHz나 28kHz의 주파수를 가진것이 市販되고 있으며 效率(90%)도 높고 永久磁石과 結合시켜서 磁氣偏倚를 하여 使用하는데 便利하므로 動力的 應用分野에서 가장 널리 使用되고 있다. 形態는 그림2와 같으며 100 kHz까지 可能하며 10W/cm²의 出力을 發生한다.

發振機는 그 構成에 있어서 自動發振機와 主發振電力增幅器가 있으며 前者는 構造가 簡單하고 調節이 容易하나 負荷인 振動子가 共振特性을 가지므로 引込現象이 일어나서 動作이 不安定하다. 특히 Q가 높은 磁歪形振動子는 이 現象이 甚해서 主發振電力增幅器가 有利하다. 이것은 電力增幅率은 C級에 比하여 적으나 比較的 安定한 AB級 push-pull增幅에 의한 陽極非同調回路가 一般的으로 使用된다. 이들 回路例를 그림3에 表示하였다. 大出力 低周波用으로는 SCR에 의한 switch充放電方式이 利用되고 있

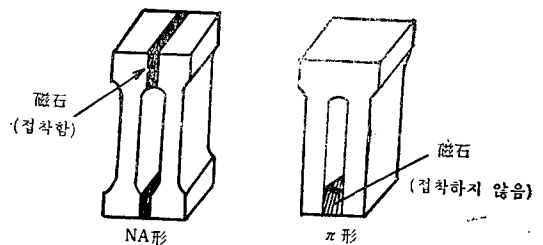


그림 2. ferrite磁歪振動子

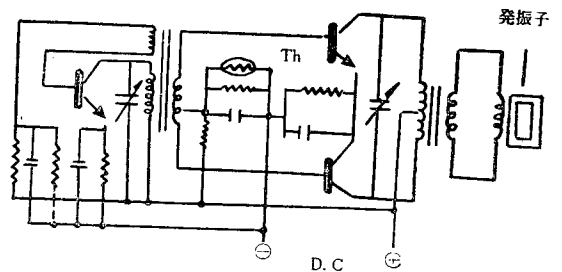


그림 3. 超音波發振機

다(그림 4 參照). 이것은 半導體素子の 發達로 因하여 過去의 眞空管으로부터 transistor로 그리고 다시 thyristor等을 利用한 發振回路로 바꾸워져 가고있는 傾向은 他의 電子機器와 마찬가지로 마찬가지다.

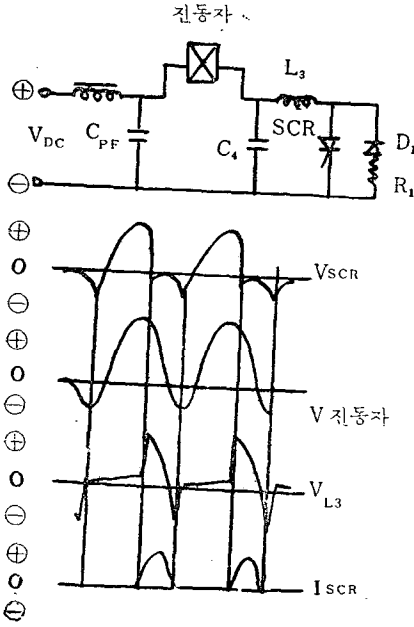


그림 4. SCR에 의한 發振

3. 超音波의 動力的 應用

超音波의 動力的 應用中 主要한 것은 加工, 洗淨, 溶接, 鍍金, 熟成, 그리고 化學反應의 促進等을 들 수 있다.

ㄱ) 超音波加工: 最近의 各種機器의 小形化와 使用材料의 多樣化에 따라 半導體材料, ferrite, 水晶, 寶石, 유리, 超硬質合金等의 단순하고 깨지기 쉬운 材料의 새로운 加工法으로 많이 利用되고 있다. 이것은 回轉運動이 不必要하므로 加工精度도 大端히 높고 加工速度도 크다. 工具는 비교적 부드러운 軟鋼, spring鋼, 피아노線등을 使用하고 研磨液은 카보란덤 #320정도의 粒子를 물과 1對1로 混合한 것을 使用하되 周波數는 20~28kHz 정도를 使用하고 이들의 超音波振幅은 數 μ 以下이므로 horn을 使用하여 15~40 μ 정도의 振幅으로 擴大하여 加工效率을 높인다.

ㄴ) 超音波洗淨: 超音波洗淨은 간단한 操作으

로 短時間(10秒~1分)에 거의 完全한 洗淨을 할 수 있으므로 時計, camera, bearing, transistor工場等은 勿論 半製品 油脂, 切削片이나 放射物質의 洗淨에 널리 利用되고 있다. 이것은 強한 壓力의 變化, Cavitation 및 化學反應의 促進作用에 의한 것이며 複雜한 形態를 가진 小部品이나 작은 구멍中의 洗淨에 效果的이다. 溶媒는 트루엔($Cl-CH=CCl_2$ 의 有機溶媒)이 많이 使用되며 20~30kHz의 ferrite振動子나 400~500 kHz의 BaTiO₃ 振動子가 使用되고 있다. 超音波의 세기는 1.5W/cm²前後가 效率的이다.

ㄷ) 超音波溶接: 超音波溶接은 電氣抵抗溶接으로는 比較的 어려운 금속인 Al나 銅이 가장 溶接하기 有利하고 여러가지 異種金屬의 溶接이 可能하며 機械的 變形이나 熱에 의한 金屬組織의 變化가 없는 것이 特徵이다. 溶接機는 그림5와 같은 構造를 가지며 短時間(數分之一秒~數

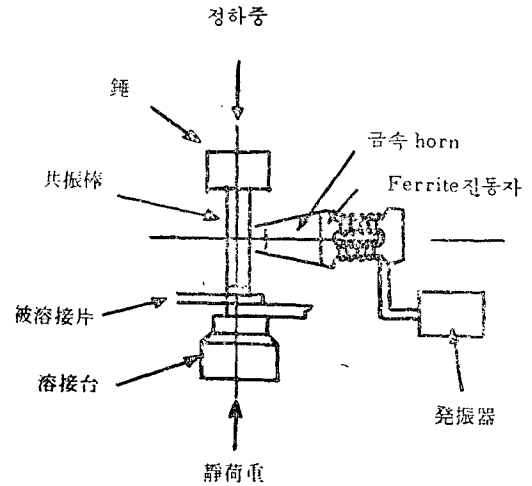


그림 5. 超音波 溶接機

秒間) 固體의 狀態로 結合되므로 극히 얇은板(10 μ 以下)이나 異種金屬의 溶接이 가능하며 A¹의 경우는 500Å정도의 酸化皮膜이 있어도 잘 용접된다. 그리고 抵抗溶接에 比하여 所要電力은 約 20分之1에 不過하다. 即 10 μ 의 Al溶接에는 30W, 2~3mm Al板用으로 2~3kW의 出力을 가진 裝置를 使用한다. 30~50kHz의 磁歪形振動子에 horn을 附着하여 tip의 振幅을 5~30 μ 정도로 하고 壓着面에 垂直한 方向에 1kg~500kg의 壓力을 加한다. 超音波 에너지를 使

用하여 Ge와 Al線 또는 金細線, Al condenser의 lead와 Al箔, 電解condenser의 lead와 電解處理箔 등의 溶接이 實用化되고 있다. 金屬以外에도 plastics의 容器 또는 film의 接着에 利用되며 polyethylene과 같이 無極性樹脂인 高周波溶着이 不可能한 plastics도 잘 接着된다.

ㄴ) 超音波납땀 : Al과 같이 酸化皮膜때문에 거의 납땀이 不可한 金屬의 납땀에 利用되고 있다.

ㄷ) 化學工業分野의 應用 : 超音波의 分散乳化作用, 凝集, 脫泡脫氣, 反應促進作用 등을 가지며 化學工業에 널리 利用되고 있다. 超音波를 鍍金에 適用하면 脫泡脫氣作用으로 陰極에서 發生한 H₂ gas를 속히 遊離하여 液外로 脫出시켜서 電流效率을 높이고 pin hole을 減少시킴으로 靜止浴에 比하여 7~10배의 電流(7~8A/cm²)를 通하게 해서 1/6~1/10로 時間을 短縮시키며 均一하고 耐蝕성이 큰 鍍金膜이 얻어진다. 이때 超音波의 세기는 0.3~0.5W/cm²가 適當하다. 超音波에 의한 熟成效果는 攪拌作用, 酸化作用, 成分의 溶出促進作用 등에 의한 것이며 whisky와 같은 蒸留酒, 合成酒같은 再製酒는 20分程度의 越音波의 適用으로 큰 熟成效果를 얻으며 寫眞乳劑의 製造過程에서 超音波를 適用하면 emulsion의 均質성과 安定性을 높이고 微小粒子에 의한 解像력과 感光도가 커진다.

其他 化學反應의 促進 分散乳化作用(20kHz前後)와 凝進作用(數百kHz) 및 抽出等 그 應用分野는 大端히 넓다.

4. 超高周波超音波技術

電子와 彈性波의 相互作用을 中心課題로한 電子音響學은 超高周波超音波技術과 密接한 關係를 가지고 發展하였다. 여기서 VHF, UHF帶의 超音波를 超高周波라 하며 bulk波와 表面波가 있다. 最近 超高周波超音波의 transducer의 發達과 CdS 등의 半導體結晶을 利用한 電力利得이 있는 進行波增幅器가 實現되어 壓電性을 仲介로한 傳導電子와 超音波가 相互作用을 가지므로 電子의 粒子性, spin性 또는 이들 兩性質과 音響波動이 서로 關連된 現象에 關한 研究가 進行되고 있다. 한편 이 超高周波超音波는 進行波의

傳送時間을 利用한 增幅作用을 가진 遲延線 또는 記憶素子로서의 特長을 살려서 電子計算機나 電子交換機의 system工學分野의 利用이 期待된다. 最近 超音波와 光의 相互作用의 應用에 關한 研究가 活發하며 超高周波超音波技術의 進歩에 依하여 laser技術 및 光彈性結晶成長技術 등이 進展하여 光의 變調 또는 光의 scanning 技術이 展開되고 光通信, 情報處理技術에 關한 應用이 期待된다. 여기서는 超音波(彈性波) 進行波 增幅現象의 理論을 간단히 소개하면 다음과 같다. 그림 6과 같이 音波系와 電子系를 서로 接近시켜 놓으면 兩系間에 에너지의 授受가 생기는 現象을 다음과 같이 說明된다. ΔE , ΔG 를 勵起된 波의 에너지 密度 및 運動量(波의 輻射壓)의 密度라하고 波의 運動量의 方向으로 u 의 速度를 가지고 움직이는 座標系에서 본것을 各各 $\Delta E'$ 및 $\Delta G'$ 라 하면 이들은 Lorentz變換을 받아서 다음식과 같이 된다.

$$[\text{波의 에너지}] = [\text{運動量}] \times [\text{位相速度}] \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta E' = \frac{1-u/v}{\sqrt{1-u^2/C^2}} \Delta E \dots\dots\dots(2)$$

$$\Delta G' = \frac{1-uw/C^2}{\sqrt{1-u^2/C^2}} \Delta G \dots\dots\dots(3)$$

여기서 C ; 光速, v ; 波의 位相速度(여기서는 超音波의 位相速度), u ; 觀測者의 移動速度.

CdS結晶을 利用한 超音波 增幅은 그림 7과같이 音波의 進行方向에 傳導電子를 흘리고 觀測者를 電子에 태워서 超音波를 볼때 $v < u$ 의 조건 下에서는 超音波는 그가 만든 壓電氣的電界를 통하여 電子流의 電子를 攪拌하여 超音波 에너지는 電子流中에서 Joule熱로 消費된다. 卽 이때는 超音波系에서 電子系로 에너지가 移動되며 觀測者(電子流)부터 본 超音波의 角周波數 ω 는 Dopler效果에 의하여 (4)式과 같이 減少되고 있다.

$$\omega = \omega_0(1-u/v) \dots\dots\dots(4)$$

여기서 ω_0 는 靜止系에서 본 超音波의 振動數다. 따라서 電子流부터 보는 超音波의 에너지는

$$E = h\omega_0(1-u/v_s) \dots\dots\dots(5)$$

로 減少된다. 卽 이에 比例한 量의 에너지의 移動이 생긴것으로 說明된다. 萬一 電子流(電流)의 速度 u 가 超音波의 位相速度 v 보다 크다면

(2)式에서 $\Delta E'$ 는 負가되어 電子流에서 에너지가 超音波로 移動된 것을 意味하므로 超音波의 振幅은 커져서 增幅作用을 하게됨을 알수 있다.

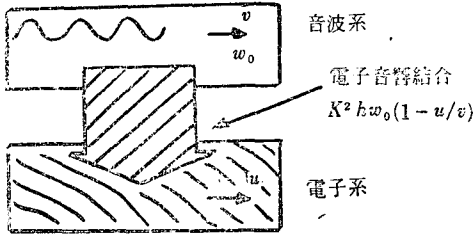


그림 6. 音波와 傳導電子의 結合

- K : 電子機械結合係數
- h : $h/2\pi$. h : Plank定數
- ω : 超音波의 角周波數
- v : 音速
- u : 電子의 移動速度

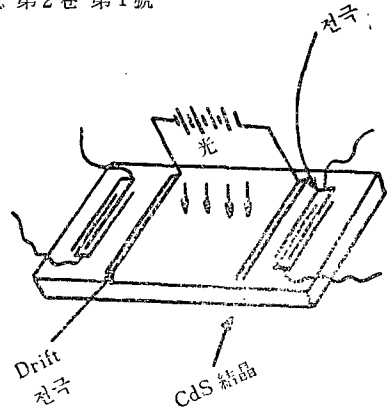


그림 7. CdS結晶에 의한 彈性表面波增幅(單一構成)

原 稿 募 集

다음 號의 原稿를 아래와 같이 募集하오니 投稿하여 주시기 바랍니다.

- (1) 內容: 報告, 最新技術解説, 세미나抄錄, 技術講座, 技術展望, 技術資料, 海外論文紹介, 圖書紹介, 施設紹介, 特許紹介, 新規格紹介, 會員動靜 等.
- (2) 投稿要領: 本誌投稿要領 參照. (本誌 p.18)
- (3) 期日: 1975年 6月 30日 限.
- (4) 送付處: 서울特別市 鍾路區 新門路 1街 24番地. 高麗빌딩 506號室 大韓電子工學會(電話 75-5979) 우편번호 110.
- (5) 本誌에 關한 問議處:
 - (가) 本學會 事務室(電話 75-5979)
 - (나) 高麗大學校 理工大 電子工學科
金憲鎭 教授(電話 (交) 94-9341~9)
 - (다) 延世大學校 理工大 電子工學科
金鳳烈 教授(電話 33-0131)
 - (라) 原子力研究所 計測制御研究室
李炳濤 研究員(電話 96-5081~5)
 - (마) 서울大學校 工大 電子工學科
李忠雄 教授(電話 96-0041~5)