



Title	GaAs表面における高周波音波の集束効果
Author(s)	本庄, 克彦; Honjo, Katsuhiko; 田村, 信一郎 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 130, 71-77
Issue Date	1986-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41980
Type	departmental bulletin paper
File Information	130_71-78.pdf



Ga As 表面における高周波音波の集束効果

本庄 克彦* 田村信一郎

(昭和 60 年 11 月 20 日受理)

Focusing Effects of High-Frequency Sound Waves at GaAs Surfaces

Katsuhiko HONJO and Shin-ichiro TAMURA

(Received November 20, 1985)

Abstract

Focusing of sound waves propagating in crystal surfaces, i. e., surface acoustic waves, is studied theoretically. It is found that surface waves are focused strongly along certain directions in the three principal crystallographic surfaces of GaAs. Pure-mode axes of the surface waves which exist in the focusing directions are also identified.

1. はじめに

音波 (高周波音波はフォノンと呼ばれる) の伝搬媒質となる固体を, 原子配置の規則性という点からみると, 短距離秩序を有するが長距離秩序はもたない非晶質固体と, 両者を共に保っている結晶固体とに分けられる。連続媒質での弾性論が適用可能な周波数領域において, 前者の弾性的性質は等方的であり, 一方後者のそれは異方的である。結晶中を伝搬する音波の位相速度は, この異方性のために伝搬軸方向に依存して変化する。それゆえ音波の分散が無視出来る場合でも, その位相速度ベクトル c と群速度ベクトル v は, 音波が特別に対称性の良い方向に伝搬する場合を除き, 一般に方向, 大きさ共に異っている。その結果, もし音波がその波源から結晶中へ, 波数空間 (k 空間) でみて一様な分布で放出されたとしても, 群速度, つまり実空間での音波のエネルギー流の方向は, ある特定な結晶軸を中心とした方向に強く集まる傾向を示す。この事は, 1969 年の Taylor 等¹⁾ による熱パルス (バルク熱フォノン) を用いた実験によって明らかにされ, フォノン集束効果と名付けられた。特に最近では, フォノン・イメージング法 (高周波音波映像法)²⁾ の開発に伴い, その詳細な解析が種々の結晶について行われている³⁻⁵⁾。

さて, 固体表面近傍にはバルク音波とは性質の異なる音波, つまり表面弾性波 (単に表面波と呼ぶことにする) が存在する⁶⁾。表面波は等方弾性体において, レーリー波として知られているものであり, その振幅は表面から遠ざかるにつれて指数関数的に減少する。表面波が存在し得るのは, 固体表面から約 1 波長程度の深さまでである。すでにのべた様に, 結晶固体には異方性があり, その表面を伝搬する表面波についてもバルク波の場合と同様, c と v は一致せず, 特定の方向に集束する事が期待される。

表面波の集束効果を明らかにする事は, それ自体, 音波物性の分野における重要な課題である

が、表面波デバイスへの応用という観点からも極めて重要である。デバイスにおいて表面波は主に、圧電性を媒介とした電気音響変換により発生させられる⁷⁾。このような表面波は、空間的にみると、波数ベクトルのほぼそろったコヒーレントな性質をもつ。またそれらの伝搬軸方向としては、 c と v が平行となる pure-mode 軸が通常選ばれる。しかし、この方向は必ずしも表面波が集束する方向であるとは限らない。もし選ばれた方向が、表面波にとって集束方向と異なるならば、波数ベクトルに少しでもばらつきがあると、エネルギー流の一部はこの pure-mode 軸から大きくそれて逃げて行く事になる。従って、実用上 pure-mode 軸のなかで、表面波が集束する方向と一致するものが重要な意味を持つだろう。さらに、それが表面波にとって強い圧電性を示す方向ならば、とりわけ好ましい訳である。

本論文においては、以上の意味において重要な GaAs について、その主要な結晶表面上を伝搬する表面波の集束効果を議論する。

2. 解析方法

解析方法は次の通りである。まず、表面波の k 空間で伝搬方向を1つ与える。これは表面波の結晶面内での二次元波数ベクトル k の方向、 $\hat{k}=k/k$ を定める事を意味する。次にこの \hat{k} に対して、格子変位の従う運動方程式、及び自由表面での境界条件（応力ゼロ）を自己無撞着に解いて表面波の位相速度 c を求める。連続媒質での弾性論が成立する周波数領域で、 c は k の大きさ $k=|k|$ には依存しない。 k は表面波の角周波数 ω を与える事により定まる。 $\omega=\omega_0$ とおくと、 $k=\omega_0/c$ により k 平面内での1点 (k, \hat{k}) が決まる。この手順を繰り返す事により、周波数一定の曲線 (ω 曲線) が k 平面内で得られる。図1は ω 曲線の1つの例を与えている。続いて ω 曲線上の点における群速度ベクトルを計算する。群速度の方向はその定義 $v=\partial\omega/\partial k$ より、 ω 曲線の外向き法線方向である事に注意しよう。具体的に v は、表面波の Poynting ベクトルを計算する事より求まる⁸⁾。図2は図1に対応した群速度曲線 (v 曲線) を示している。

等方弾性体においては、 c が \hat{k} によらないから ω 曲線は円である。従って v は \hat{k} に平行となり、 k 平面内で特定の方向に表面波の波数ベクトルが集中していない限り、表面波のエネルギーが伝搬する実際の結晶表面内においても表面波の集束はない。一方、結晶のような異方性固体では、表面波の位相速度 c は \hat{k} に依存しており、図1が示すように ω 曲線は凸、及び凹状の部分から成っている。この曲線上を k が $A \rightarrow G$ と移動するにつれて、 v は v 曲線上を $A' \rightarrow G'$ と移動する。

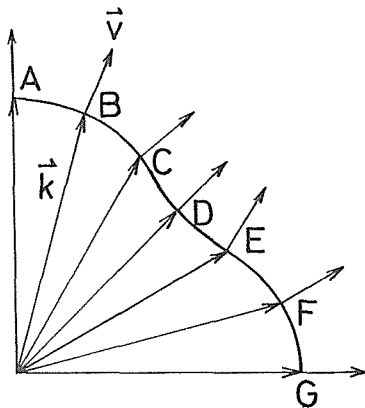


図1 ω 曲線

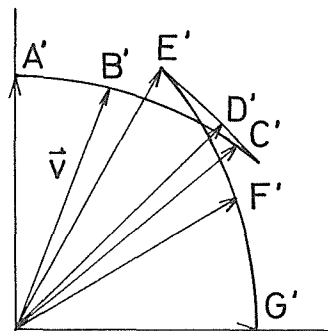


図2 v 曲線

v 曲線は E' 点でカスプをなして折り返しており、伝搬方向の関数として多価の曲線となっている。カスプを成す方向は、 ω 曲線上の変曲点 (E) に対応している事が容易にわかる。この結果はまた、表面波が k 平面上で方向について一様な分布をしていたとしても、それは実際の結晶表面上で v 曲線が複数の分枝をなす方向に集束する事を意味している。これが表面波、つまり固体表面での音波の集束に他ならない。定性的には表面波の集束は ω 曲線の凹部分の存在に由来し、一方非集束は凸部分に由来している事がわかる。

表面波の集束度を定量的に評価するには、 $A = \Delta\theta_k / \Delta\theta_v$ で定義される集束因子 A を考えるとよい。ここで $\Delta\theta_k$ は表面波が k 平面で占る微小角度であり、 $\Delta\theta_v$ は実際の表面上での対応する角度である。もし k が ω 曲線上の変曲点であるとする、群速度 v の方向はそこで折り返すから $\Delta\theta_v = 0$ である。つまり ω 曲線上に変曲点があると、対応する結晶表面上の方向で集束因子 A は発散する。この方向は caustics と呼ばれているものである⁸⁾。caustics における集束因子の発散はしかしながら積分すると有限になることが知られており、実際有限な大きさをもつポロメータで観測される音波の強度が発散することはない。しかし caustics をはさんで音波の集束、非集束の方向は明確に区別される。以下に具体的結果を示す。

3. 計算結果

3.1 (001) 面

図 3(a), 3(b) は GaAs の (001) 面上での表面波の ω 曲線、及び v 曲線を示している。 ω 曲線は凸、凹両部分より成り、 v 曲線にはカスプが B' , D' に現われている。図 3(c) は、この面内での集束因子の角度依存性を表わしている。 $A > 1$ となる方向が表面波の集束する方向である。 B' , C' の方向に集束因子の鋭い立ち上りのある事がわかる。(001) 面内の pure-mode 軸は $[010]$ 軸の方向から測って、 0° , 4.5° , 22.4° , 及び 45° にあり、このうち 22.5° の方向にあるものが、表面波の集束方向に含まれている事が図 3(c) よりわかる。

3.2 $(\bar{1}10)$ 面

図 4(a)–4(c) に GaAs の $(\bar{1}10)$ 面上での結果が示されている。この面内では、 v 曲線上のカスプの位置が非常に接近しており ($[001]$ 軸方向より測って、約 50.5° と 51.0° 方向にある)、集束因子の角度依存性では、これらの効果が重なり合って鋭いピークが形成されている。一方、 $[001]$ 軸方向を中心に、幅の広い集束因子の山も見えている。これは ω 曲線が、 $[001]$ 軸方向にほぼ垂直な平坦部分を形成している事に由来する。この面内での pure-mode 軸は、 $[001]$ 軸方向より 0° , 42.0° , 51.5° , 及び 90° の方向であり、このうち 0° と 51.5° の方向が、表面波の集束方向と一致している。

3.3 (111) 面

GaAs の (111) 面上における計算結果は図 5(a)–5(c) に与えられている。 $[111]$ 軸は 3 回対称軸であり、 ω 曲線、及び v 曲線には 60° 毎に同じ構造が繰り返し表われている。 ω 曲線の変曲点に対応する v 曲線のカスプは、 $[11\bar{2}]$ 軸を中心に、 $\pm 2.5^\circ$ の方向に位置している。この面内での pure-mode 軸は、 $[011]$, 及び $[11\bar{2}]$ 軸 (とそれらに等価な軸) 方向であり、後者が集束方向に位置している事がわかる。

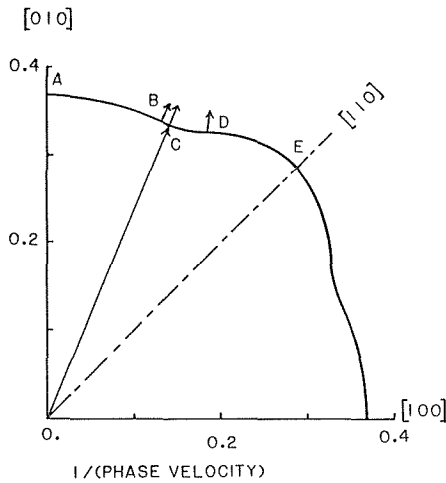
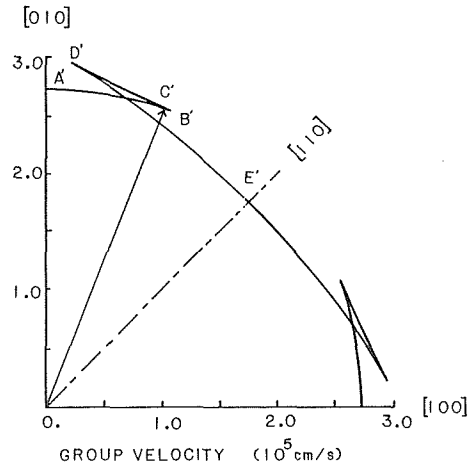
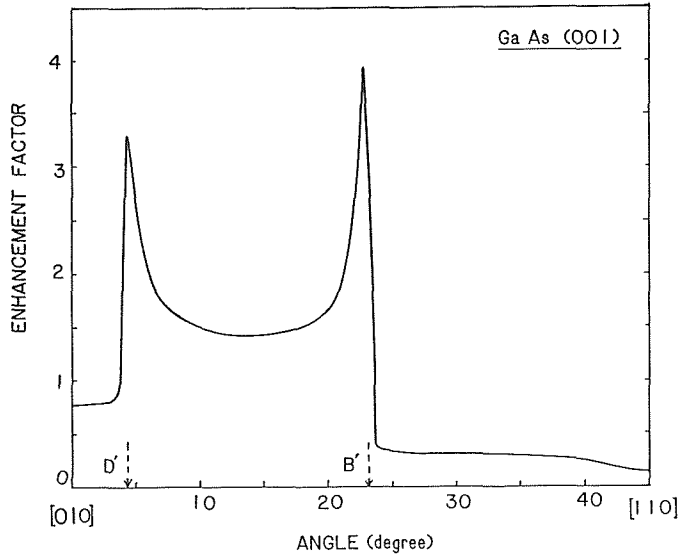
図 3(a) (001) 面上の ω 曲線図 3(b) (001) 面上の v 曲線

図 3(c) (001) 面上の集束因子

4. ま と め

我々の計算結果より、次の事が明らかになった。表面波の集束の様子には2通りあること。1つは、 ω 曲線が凸状であるがほぼ直線的な部分を持つ場合で、このとき集束因子の伝搬方向依存性には比較的なだらかなこぶ状の隆起が現われる。もう1つは、 ω 曲線が凹状の部分を持つ場合で、このとき v 曲線にはカuspが生じ、集束因子はカuspの方向に鋭い特異的な立ち上りを見せる。後者の集束の振舞いは、GaAsの主要な3つの結晶面を表面として伝搬する表面波について、等しく現われる事が判った。この性質は立方晶に属する結晶において常に生じる事ではなく、むしろ異方性因子 $\eta = 2c_{44}/(c_{11} - c_{12})$ の大きさによって決まるものである。GaAsにおいては $\eta = 1.8 > 1$ である。 $\eta < 1$ であるような結晶の(001)面上を伝搬する表面波では、集束因子Aはほ

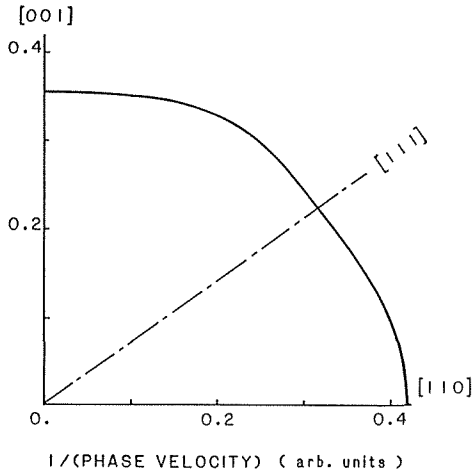


図 4(a) $(1\bar{1}0)$ 面上の ω 曲線

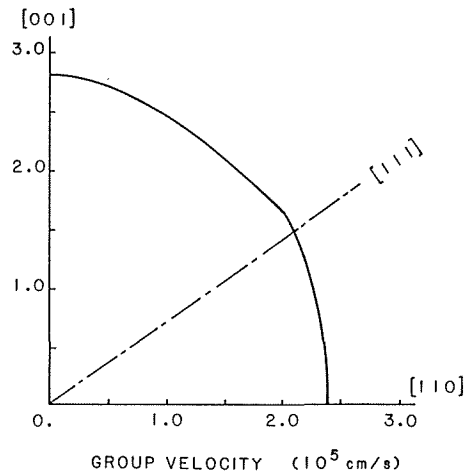


図 4(b) $(1\bar{1}0)$ 面上の v 曲線

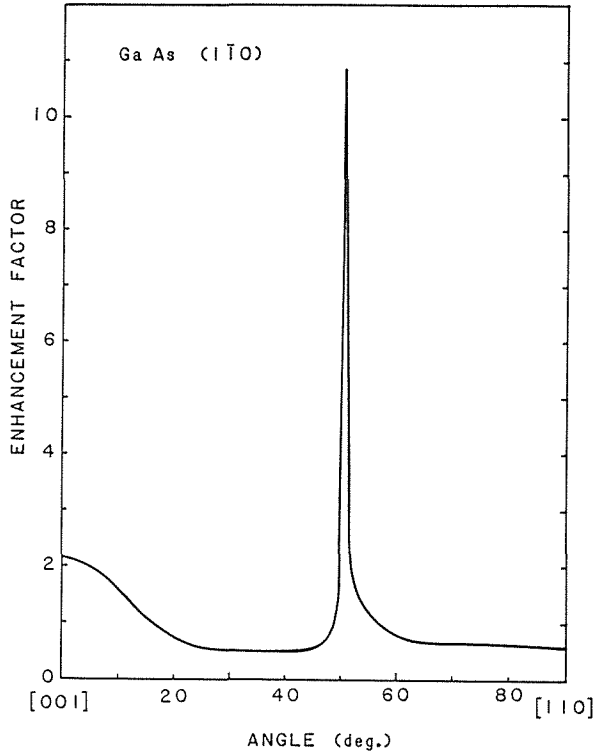


図 4(c) $(1\bar{1}0)$ 面上の集束因子

ば全ての伝搬方向にわたって $A=1$ である事がわかっている⁹⁾。GaAs は圧電性結晶であるが、ここでの取り扱いではその効果を見逃した。その理由は、圧電性による表面波の音速変化は $\Delta c/c = 1.9 \times 10^{-3}$ と小さいからである。なお、本論文の一部はすでに発表されている¹⁰⁾。

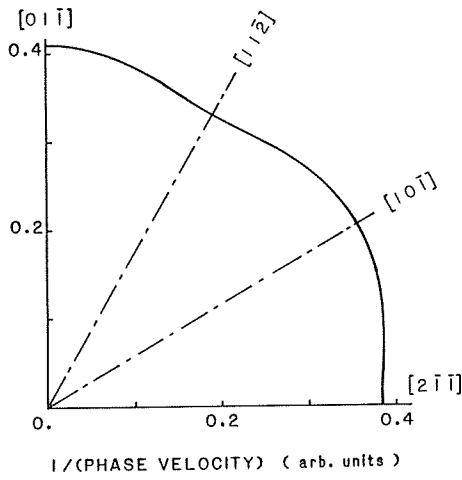


図 5(a) (111) 面上の ω 曲線

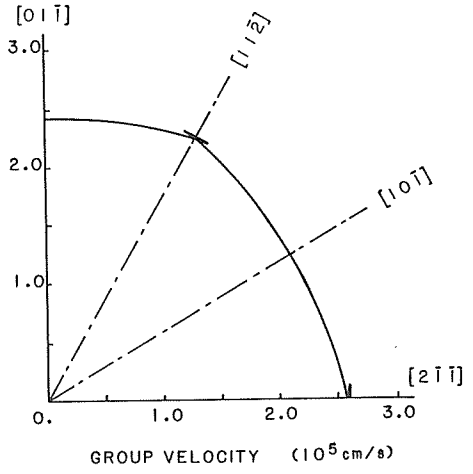


図 5(b) (111) 面上の v 曲線

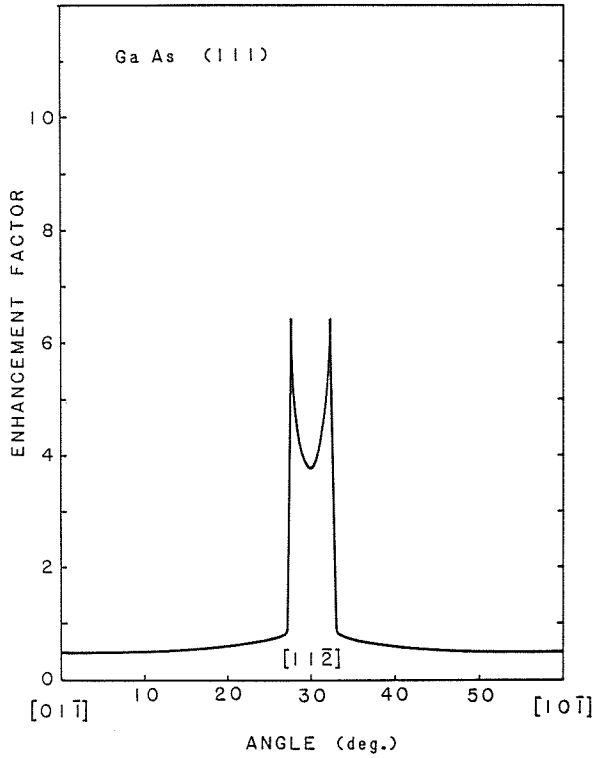


図 5(c) (111) 面上の集束因子

References

- 1) B. Taylor, H. J. Maris, and C. Elbaum : Phys. Rev. Lett. **23**, 419 (1969) ; Phys. Rev. **B3**, 1462 (1971).
- 2) G. A. Northrop and J. P. Wolfe : Phys. Rev. **B22**, 6196 (1980).
- 3) F. Rösch and O. Weis : Z. Phys. **B25**, 101 (1976).
- 4) A. G. Every, Phys. Rev. **B24**, 3456 (1981).
- 5) D. C. Hurley and J. P. Wolfe : Phys. Rev. **B32**, 2568 (1985).
- 6) G. W. Farnell, in *Physical Acoustics*, edited by W. P. Mason and R. N. Thurston (Academic, New York, 1970) vol. 6, p. 109.
- 7) A. A. Oliner : *Acoustic Surface Waves* (Springer, 1978).
- 8) P. Taborek and D. Goodstein, Solid State Commun. **33**, 1191 (1980).
- 9) K. Honjo and S. Tamura : (unpublished work).
- 10) S. Tamura and K. Honjo : Jpn. J. of Appl. Phys. **20**, Suppl. 20-3, 17 (1981).