Ge 中の Te の赤外光伝導

横山彰人^A 中田博保^A 羽藤隆夫^B 藤井研一^B 大山忠司^C 坪内夏朗^D 今中康貴^E 竹端寛治^E 高増正^E ^A大阪教育大学大学院 自然研究講座 ^B大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 ^C福井工業大学 ^D大阪大学大学院 工学研究科 自由電子レーザー研究施設 ^E物質・材料研究機構 強磁場共用ステーション

Infrared Photoconductivity in Ge:Te

A.Yokoyama^A, H. Nakata^A, T. Hatou^B, K. Fujii^B, T. Ohyama^C, N. Tsubouchi^D, Y. Imanaka^E, H. Take hana^E, T. Taka masu^E
^ADep. of Arts and Sciences Osaka-kyoikuUniversity, 4-698-1 Asahigaoka Kashiwara Osaka 582-8582 Japan
^BDepartment of Physics, Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka Osaka 560-0043 Japan
^CLiberal Arts, Fukui University of Techonology 3-6-1 Gakuen, Fukui 910-8505 Japan
^DInstitute of Free Electron Laser, Osaka University 2-9-5 Tsuda-yamate, Hirakata Osaka 573-0128 Japan
^ENational Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaragi 305-0047, Japan

Abstract

We study Fano resonances between the conduction band and $1S(T_2)$ donor levels with LO phonons in Te doped Ge. The structures are explained by Fano resonance of LO phonon associated excited states of the donor with the conduction band. Scattering due to an ionized impurity is responsible for the broad structure.

1. はじめに

Ge 中の Te はダブルドナーで、そのイオ ン化エネルギーは 90meV と 220meV であ る。不純物準位のエネルギー差が、TEA CO₂ レーザーとほぼ等しいため、テラヘルツ光 源として期待されている。これまでに Ge 中の Te ドナーについての報告はいくつか あるが、詳細なものはなかった。今回、我々 は伝導帯のフォノン共鳴状態についての実 験を行った。

Grimmeis 等は赤外光伝導と DLTS を観 測した。彼らはドナーの第一イオン化エネ ルギーと 1S(T₂)など、いくつかの状態のエ ネルギーを決定した。Ge 中の Te だけでな く Ge 中の Se についての実験も行っていた。 1 S(T₂)を含んだファノ共鳴は光イオン化 のバックグラウンドの上に出てきた。その 共鳴の幅は 2 meV である。

赤外光伝導のファノ共鳴の論文は弱い励 起のため、すべて不純物は中性だった。わ れわれの測定では自由電子レーザーを使用 した。この励起強度は不純物をすべてイオ ン化するのに十分である。ファノ共鳴は伝 導帯の状態とフォノンを持つ不純物の励起 状態の結合によるものである。イオン化さ れた不純物のクーロンポテンシャルによる 分離した状態と連続な状態との干渉のため に大きな構造がえられた。

我々は自由電子レーザーで赤外光伝導の 観測を行った。その結果から Te のイオン化 エネルギーが決定でき、伝導帯と不純物の 励起状態とフォノンの結合状態のファノ共 鳴を FEL で観測した。

2. 実験

自由電子レーザー(FEL)の平均出力は 20mW で、振動数は 10Hz である。測定波 長は 8~12 μ m である。試料は不純物濃度 が 1.2 × 10¹⁴cm⁻³、これをヘリウム冷凍機に セットし、FEL を ZnSe のウィンドウを通 して、試料に照射した。赤外光による抵抗 の変化をデジタルオシロスコープで検出し た。

低 温 で 弱 励 起 で の 赤 外 光 伝 導 を BOMEM DA8 を使用して行った。

3. 結果と考察

Ge 中の Te の第一イオン化エネルギーは およそ 90meV である。そのため、我々は低 温で 90meV を閾値とするの赤外光伝導を 期待することができた。図1は赤外光伝導 の波形である。90meV 付近から立ち上がり、 110meV, 150meV 付近にピークが観測され た。



図1 Ge:Teの赤外光伝導

イオン化エネルギーに対するピークの比率は 1.22 と 1.67 である。それらは kp 近似で 1.43 と見積もられる。二つのピークの存在は伝導帯に対する不純物準位からの電子の遷移の簡単なモデルで説明できる。(図 2)



図 2 Ge 中の Te のエネルギーレベル

我々は電子とフォノンの相互作用による ものであると推測した。二つのピークの間 のエネルギー差は40meVなので、 点での LOフォノンのエネルギーに等しい。ファノ は同じエネルギーの連続状態と離散状態と の間の配置の相互作用によるヘリウム原子 のイオン化を分析した。この非対称なスペ クトルはファノ共鳴と呼ばれ、SiやGeの 赤外光伝導で観測された。非対称な形はLO フォノンと不純物の励起状態の結合された 状態を与える。我々は120と160meV付近 でこの構造を観測した。

はじめに Lucovsky によるモデルで、簡 単な赤外光伝導を近似した。光伝導の式は 以下のようになる。

$$S(h v) = \frac{A(hv - E_i)^{\frac{3}{2}}}{(hv)^{3}}$$

ここでh はフォトンのエネルギーであり、
Ei はドナーのイオン化エネルギーである。
非対称な構造を分析するために、我々はエ
ネルギーとして以下のものを導入する。

$$\varepsilon = \frac{(E - E_{\phi} - F)}{\widetilde{A} / 2}$$

ここで E は 1 s(T2) とフォノンで束縛さ れたエネルギーである。

F と \tilde{A} は相互作用によるエネルギーシフト と広がりである。吸収スペクトルは非対称 パラメータの q とエネルギーE の関数で表 される。

$$I = \frac{A (q + \varepsilon)^2}{1 + \varepsilon^2}$$

以下のパラメータで、図1の光伝導スペク トルの近似曲線をえがくことができた。

 E_{i} =93.5meV,E +F=121,159meV, \tilde{A} = 30,16 meV,q=1 である。二つの共鳴の間の 違いは 38 meV であり、これは光学フォノ ンのエネルギーにちょうど一致する。121 と 159meV での共鳴はそれぞれ一つか二つ のフォノンによるものである。

図 2 に Ge 中の Te ドナーのエネルギー図 を示す。不純物の励起状態のはじめのエネ ルギーは 83meV で、これは Grimmeis に よる実験結果と一致する。結果として、エ ネルギーシフトの F はこの場合はゼロであ る。

共鳴の広がりを決めるパラメータÂは Ge:Se における報告にあった 2meV と比較 すると極端に大きい。これはイオン化され た不純物のポテンシャルによる相互作用に よるものであると考えた。FEL による実験 では、レーザーの発振強度がすべてのドナ ーをイオン化するには大きすぎる。電子フ ォノン相互作用に加えて、クーロンポテン シャルは相互作用に影響する。そのため伝 導帯や不純物の励起状態を通して二次の効 果である。

one-phonon 状態が two-phonon 状態より も広がっているのは伝導帯の端近くに励起 状態がたくさんあるからである。

BOMEM DA8 で赤外光伝導の実験を行った。自由電子レーザーでの赤外光伝道の 実験と同様に 90meV から立ち上がる伝導 波形が得られた。この 90meV 付近は Te の 第一イオン化エネルギーにも対応し、今回 の実験と Grimmeis らの実験とよく一致し ている。さらに 220meV 付近から立ち上が る大きなピークも Te の第二イオン化エネ ルギーに対応していると考えられる。



図 3 Ge:Te 赤外光伝導

赤外光伝導の温度変化依存性の結果は次 の図3のようになった。図4は伝導波形の 220meV付近のピークの値の温度依存性で ある。このように温度が10K以上になると 急に光伝導は弱くなっている。これはドナ ーの電子がTeの基底状態から伝導帯や不 純物の励起状態に熱的に励起されたため光 伝導が弱くなったと考えられる。 また図1の90meVから170meVの範囲に

振動的な伝導波形が見られた。この範囲で 複数本のピークは見られるがファノ共鳴が 観測された可能性がある。



図 4 Ge:Te の赤外光伝導の最大ピークの温度依存性

4. まとめ

- 自由電子レーザーで Ge 中の Te の ドナー電子を励起すると,Ge の伝 導帯と 1S(T₂)+LO フォノンと 1S(T₂)+2LO フォノンのエネルギ ー準位でファノ共鳴が観測された。
- 赤外分光器(BOMEM DA8)で光伝 導の実験から Te の第一イオン化 エネルギーの 90meV と第二イオ ン化エネルギー220meV 付近から 光伝導の立ち上がりが見られた。

5. 参考文献

- 500 1. E.O.Kane, J. Phys. Chem. Solids, **1** 82 (1956).
 - 2. W. Kohn, Solid State Phys. **5** 257 (1957).
 - 3. G. Lucovsky, Solid State Commun. 3 299 (1956).
 - 4. U. Fano, Phys. Rev. 124 1866 (1956).

5. H.G. Grimmeiss, L. Montelius and K. Larsson, Phys.Rev.B **37** 6916 (1988).