## 可視光励起光電子分光法を用いた半導体超格子における 伝導電子のエネルギー分布測定

Measurement of Energy Distribution of Conduction Electrons in

Semiconductor Superlattice by Visible Light Photoemission Spectroscopy <sup>o</sup>市橋 史朗<sup>1</sup>、西谷 健治<sup>1</sup>、董 鑫宇<sup>1</sup>、川口 昂彦<sup>2</sup>、桑原 真人<sup>1</sup>、

原田 俊太<sup>1</sup>、田川 美穂<sup>1</sup>、伊藤 孝寛<sup>1</sup>、宇治原 徹<sup>1</sup>(1. 名大院工, 2. 名大 VBL) <sup>°</sup>Fumiaki Ichihashi<sup>1</sup>, Kenji Nishitani<sup>1</sup>, Xinyu Dong<sup>1</sup>, Takahiko Kawaguchi<sup>2</sup>, Makoto Kuwahara<sup>1</sup>, Shunta Harada<sup>1</sup>, Miho Tagawa<sup>1</sup>, Takahiro Ito<sup>1</sup>, Toru Ujihara<sup>1</sup> (1.Nagoya Univ., 2.VBL Nagoya Univ.) E-mail: ichihashi@sic.numse.nagoya-u.ac.jp

【背景】 中間バンド型太陽電池、ホットキャリア型太陽電池などの第三世代太陽電池[1]では、バンド 構造やキャリア挙動の精密な制御が求められ、そのためには、これらを評価する新たな手法が必要と なる。我々は伝導帯を伝導する電子をエネルギー分光する手法として、可視光励起光電子分光(VPS)法 の開発を進めている[2]。本手法では、可視光で伝導帯に励起した電子を負性電子親和力(NEA)表面か ら真空中に直接取り出して、角度分解光電子分光を行う。これまでに、我々は本手法により半導体超 格子構造における伝導帯ミニバンドを伝導する電子のエネルギー分光に成功している。本研究では、 伝導帯ミニバンド内のキャリア挙動を解明するために、励起光エネルギーによる伝導帯ミニバンド中 の電子のエネルギー分布の変化について調べた。

【実験方法】 超格子試料は有機金属気相成長法により作製した。半絶縁性 GaAs(001)基板上に 2.6 nm の GaAs<sub>0.83</sub>P<sub>0.17</sub> 障壁層と 4.2 nm の In<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>As 井戸層を 20 ペア成長した。最表面層は 2.6 nm の GaAs<sub>0.83</sub>P<sub>0.17</sub>である。また、すべての層に 2×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>の Zn をドープしている。Figure 1 に model-solid 理論および Kronig-Penney モデルにより求めた InGaAs/GaAsP 超格子のエネルギーバンド図を示す。励起光エネルギーhv=1.25、1.43、1.59、1.88 eV のレーザー光を用いて、-80 V のバイアスを印加しながら VPS 測定を行った。

【結果と考察】 Figure 2 にそれぞれの励起光における放出角度 $\theta=0^\circ$ でのエネルギー分布スペクトルを示す。横軸は測定された運動エネルギー( $E_m$ )、縦軸は光電子の強度で、 $E_m=76.91$  eV での強度で規格化している。hv=1.25 eV はバンドギャップ(1.32 eV)よりエネルギーが低いが、ピークが観測されている。これは最表面のバンドベンディング領域に励起された電子に起因したピークであると考えられる。これに加え、hv=1.43 eV 以上の光では  $E_m=77.0$  eV 付近にもピークが観測された。これは 1 次伝導帯ミニバンドに励起され伝導してきた電子に起因したピークであると考えられる。さらに、hv=1.59 eV では $E_m=77.1$  eV 付近から高エネルギー側に強度の増加がみられた。これは、2 次伝導帯ミニバンド中の伝導電子と考えられる。また、 $E_m=77.1$  eV 以上での強度増加は hv=1.88 eV で特に顕著になっている。このことは、励起光のエネルギーの増大により 2 次伝導帯ミニバンドを伝導する電子の割合が増加することに対応する。

本研究は科研費・挑戦的萌芽研究(25600088)の成果である。また、先端計測分析技術・機器開発プログラムにおいて(株)VICインターナショナルと MBS ジャパン(株)と共同で VPS 装置の開発を進めている。[1] M. A. Green, Prog. Photovolt.: Res. Appl., 9, 123 (2001).

[2] 西谷健治 他, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 19p-D17-12.





**Figure 1: Energy diagram of the InGaAs/GaAsP superlattice.** The zero energy is set at the top of the first valence mini-band.

Figure 2: Energy distribution curves of  $\theta = 0^{\circ}$  measured by VPS. Each spectrum was normalized by the intensity at  $E_m = 76.91$  eV, which was the peak energy of the spectrum when the photon energy was 1.25 eV.