10.半導体中の非熱平衡電子波伝搬実証

量子効果デバイスに重要な半導体中での非熱平衡電子の波動伝搬を実証した研究成果を 以下で紹介する。

二重スリット構造による電子波干渉パターン測定干渉縞観測の方法を図1(a)に示す。ま ず電子はエミッタから平面波として放射され、二重スリットを通過し、細い電極を配置し たコレクタ面に到達する。二重スリットによりコレクタ面上の波動関数 $\psi(x)$ には干渉縞が

現れる。位置xにある微細コレクタ電極が電子を捕捉する確率は $|\psi(x)|^2$ に比例することから、

複数の微細電極の電流測定から $|\psi(x)|^2$ の分布を測定し干渉縞を見ることができる。もう一つの方法として、図示の磁束密度Bによるローレンツ力で電子の行路を曲げて干渉縞全体をx軸方向に平行移動させ、一つの微細電極電流 I_c のB依存性から $|\psi(x)|^2$ の分布すなわち干渉縞

を見ることができ、今回はこちらの方法を採った。

ホットエレクトロン生成と伝搬を図1に示す。図1(a)の網掛け部は不純物半導体で熱平 衡電子が存在し導電層である。エミッタとベースの導電層間に薄いポテンシャルバリア層 があり、電圧 V_{EB}が印加されると電子はこのバリア層をトンネル効果で透過し、図1(b)に示 した電子伝搬方向に急激に加速される。この急加速された電子は熱平衡状態から大きく外 れたホットエレクトロンとなり、緩和時間だけ無衝突で高速走行する。

ホットエレクトロンのエネルギーEと半導体の伝導帯底エネルギーE_cとの関係を図 1(b) に示す。Eは、ベース電極層でフェルミレベルより 50meV以上高く、二重スリットバリア 層ではバリアの頂上から 50meVほど低く、伝搬層では伝導帯底より 50meV以上高い。二 重スリットバリア層は十分に厚くトンネル透過はほとんど生じない。

干渉縞が明瞭に見えるよう二点を考慮した³⁾。第一点として、干渉縞周期に比べて観測用 微細電極周期を十分に小さくするために、電子波長 λ 、スリット間隔d、微細コレクタ電極 周期T、伝搬距離Lに対して $dT \leq \lambda L/2$ とした。伝搬距離は電子が位相破壊を受けずに走行

できる距離、位相コヒーレント長、より短くなければならない。そこで λ =20nm(電子エ ネルギー100meVに対応)、*L*=200nm、*d*=25nmおよび*T*=80nmとした。

第二点として、二重スリットバリアに垂直入射した平面波が作る干渉縞と、斜め入射し た波の干渉縞とが互いに打ち消し合わないように入射角広がりを制限した。このために図 1(b)に示すようにエミッタ半導体のフェルミレベルと伝導帯底エネルギーとの差*E_F*-*E*cを 小さな値、6meV、にし、図 1(a)に示すように傾斜組成層を挿入して*V*_{EB}が印加された状態 でエミッタ・ベース間バリアのエミッタ側に電子が蓄積しないようにした。

試料は図 1(a)に示すように InP、GaInAs および GaInAsP のヘテロ接合層構造をもち、 全体が同じ格子定数をもつ単結晶からなる。これを、有機金属気相成長、埋込結晶成長、 二重スリットと微細コレクタ電極との 10nm オーダーでの位置合わせ、電子ビームおよび 光リソグラフィ、化学エッチング、ドライエッチング、電子銃蒸着、リフトオフ、の各プ ロセスを実施して作製した。電子ビームおよび光リソグラフィはそれぞれ 11 および 3 回 行った。スリット幅 12nm、二重スリット中心間隔 25nm、コレクタ電極幅 40nm、間隔 40nm という超微細構造をもつ試料を作製した。

印加磁東密度Bに対する中央コレクタ電流 I_e の変化を測定した(図 2)。エミッタ・ベース端子間電圧 V_{EB} を160mVに固定し、液体ヘリウムに浸して温度を4.2Kとし、超伝導磁石を用いた。各磁東密度で7回測定し中央値をプロットした。挿入図に全データを示す。

図2の実線は量子ビーム伝搬法で求めた二重スリット干渉縞の理論曲線である。磁界変 調特性は干渉縞の理論とよく一致している。電流値および磁界変調振幅について検討した 結果、電子がエミッタから放射された後、途中で位相破壊を受けずにコレクタ電極に到達 する確率について、実験では0.7%であり、これはベース層中の電子電子散乱、伝搬層中 の縦光学(LO)フォノン散乱を考慮して見積もった理論値と3倍以内で一致する。

参考文献

- K. Furuya, Y. Ninomiya, N. Machida and Y. Miyamoto, Phys. Rev. Lett. 91, 216803-1 (2003)
 K. Furuya, Y. Ninomiya, N. Machida and Y. Miyamoto, Jpn. J. Appl. Phys., 44, 2936 (2005)
- 2. H. Hongo et al., Jpn. J. Appl. Phys. 33, 925(1994), および H. Hongo, Y. Miyamoto, M. Gault and K. Furuya, J. Appl. Phys. 82, 3846(1997).
- 3. K. Furuya, J. Appl. Phys. 62, 1492(1987), J. Crystal Growth 98, 234(1989), および Jpn. J. Appl. Phys. 30, 82(1991).



図1 ホットエレクトロンの二重スリット干渉を観測したデバイス構造 (a)は化合物半導体ヘテロ接合層構造の断面模式図で、紙面に垂直方向には2µmにわたり均一構造をもつ。電圧VEBがかかるエミッ タ・ベース間バリアをトンネル効果で通過した電子が平面波として二重スリット層に入射し、スリットを通過した電子の波動関数 に干渉縞が現れる。磁束密度Bにより干渉縞は微細電極上を掃引される。(b)はヘテロ接合層構造における伝導帯底エネルギーの空 間分布とホットエレクトロンのエネルギーを示す。太線はバンドプロファイルである。



図2 印加磁束密度に対するコレクタ電流の変調特性 温度4.2K、ベースエミッタ間電圧160mVで測定した。各 磁束密度で7回測定し、それらの中央値をプロットした。 挿入図は全データを示す。実線は二重スリットを通過した 電子波に磁界が加わった時のコレクタ電流を量子ビーム伝 搬法を用いて理論的に求めたものである。