OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	一巻コイル法による超強磁場を用いたGaAs/AlAs超格子のサイクロトロン共鳴測定
Author(s)	百瀬, 英毅
Citation	大阪大学低温センターだより. 2006, 136, p. 20-25
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/7586
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

研究ノート

一巻コイル法による超強磁場を用いた GaAs/AlAs超格子のサイクロトロン共鳴測定

低温センター　百　瀬　英　毅（内線7769）

１．はじめに

本研究ノートでは一巻コイル法を用いた超強磁場*発生技術とこの超強磁場を用いたGaAs/AlAs超格子*のサイクロトロン共鳴測定について紹介する。これは1994年に東大物性研の三浦登教授と阪大工学部の濱口智尋教授とによって始められた共同研究で行われたものである。ちなみに、この研究枠組みは現在でも東大物性研の嶽山正二郎教授と筆者とによって継続されていて、超強磁場下における興味深い物性研究が続けられている。今回は紙面の都合によりGaAs/AlAs超格子におけるΓ－Xクロスオーバ現象を中心にご紹介する。

２．Γ－Xクロスオーバ現象

半導体材料を用いた超格子構造がEsakiとTsuによって提案されたのが1970年である[1, 2]。まもなくして、超格子の各層が比較的厚い領域では、この構造がクローニッヒ・ペニーモデルで良く説明されることが分かった[3－5]が、その後、各層が薄い超格子についての関心が高まった。簡単に言えば「直接遷移型半導体のGaAsと間接遷移型半導体のAlAsを交互に積み貸させた超格子はどんな性質を持つのか？」ということである。この後、種々の研究が積み重ねられて理解が深められた。アプローチの仕方で幾つかの説明があり、超格子構造を結晶学的に捉え直してバンド構造を求めるアプローチが最も的確である。これに対して、先のクローニッヒ・ペニーモデルの延長線上にある説明が比較的分かりやすいので、ここでは後者による説明を行う。

本研究ではGaAs層とAlAs層の積層数が同じである（$GaAs)_n/(AlAs)_n$超格子を対象とする。図1にクローニッヒ・ペニーモデルによる超格子の伝導帯を模式的に表し、太い実線は各層のΓ点を、太い点線はX点を示している。そして、図中の細い実線はGaAs層内に太い実線により形成される井戸での基底準位（Γ点の準位と呼ぶ）を示している。細い点線についてもAlAs層での同様の準位（X点の準位と呼ぶ）である。各層が厚い超格子では、図1(a)に示す通りGaAs/AlAsの多重量子井戸と同様で、Γ点の準位が伝導帯で最も低くなる。しかし、各層を薄くしていくと、Γ点の準位は電子有効質量が小さいために急速にエネルギー位置が高くなる。一方、X点の準位では電子有効質量が大きいためにエネルギー位置の上昇は緩やかである。このために、ある積層数になると図1(b)

---

*この印の付いている語は、後に「用語説明」があります。

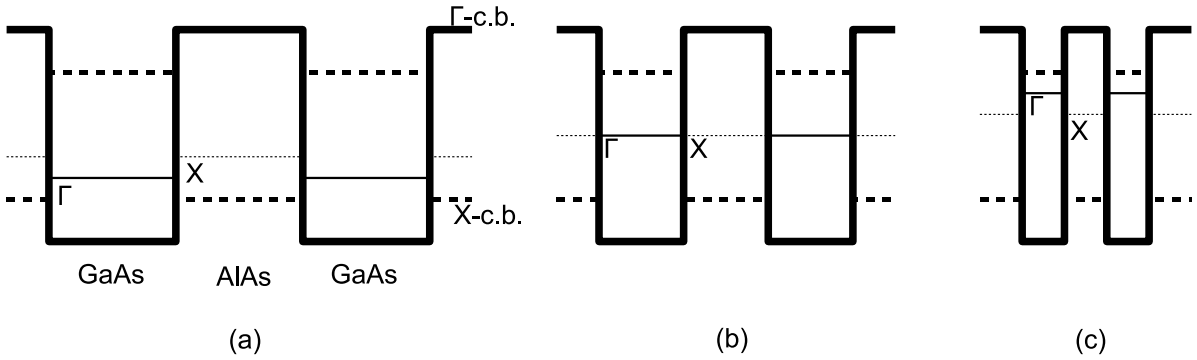

図 1　(GaAs)$_n$/(AlAs)$_n$超格子の伝導帯を模式的に表した図。太い実線はΓ点を、太い点線はX点を表し、細い実線、細い点線は、それぞれの井戸層内での基底準位を表している。超格子の積層数nは（a）→（b）→（c）となるに従って小さくなっている。

のように両方の準位が一致し、さらに各層が薄くなると、AlAs層にあるX点の準位の方が伝導帯内で最低準位となる。このように、最低準位がΓ点からX点に移り変わるためにΓ－Xクロスオーバと呼ばれる。

当初は、光学実験とそれを説明する理論計算とが活発に行われた[6]。筆者が所属した研究室でも研究を行っていたので、その結果[7]をご紹介する。図 2 は光学測定と理論計算の結果を一緒に示したものである。横軸に超格子の積層数nを、縦軸に電子の遷移エネルギーを取っていて、○印と●印がフォトリフレクタンス測定の結果、×印がフォトルミネッセンス測定の結果、そして、各線が第 2 近接sp^{3}強結合近似法による計算結果である。積層数nが12付近に着目していただくと、ここで最低準位のΓ点とX点とが入れ替わっている。すなわち、上で説明したΓ－Xクロスオーバ現象は、(GaAs)$_n$/(AlAs)$_n$超格子ではn＝12で起きる、という結論が得られた。

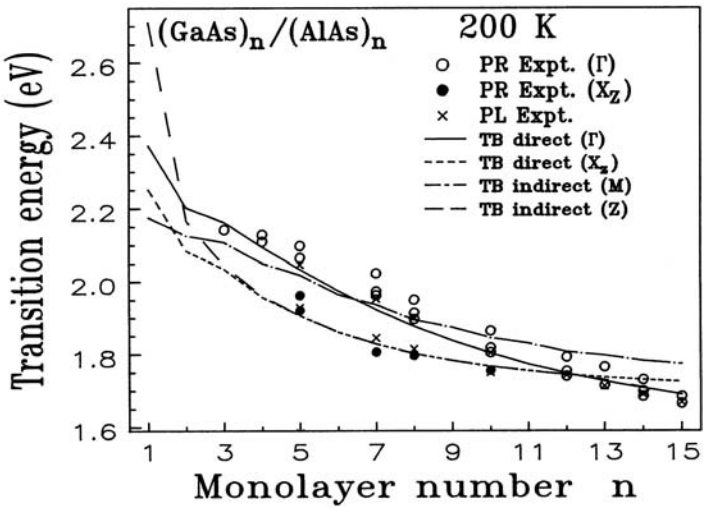

図 2　(GaAs)$_n$/(AlAs)$_n$超格子における電子の遷移エネルギーの積層数n依存性。○印と●印がフォトリフレクタンス測定の結果、×印がフォトルミネッセンス測定の結果、そして、各線が第 2 近接sp^{3}強結合近似法による計算結果を示している。

ところで、このような光学測定では得られた信号がΓ点の電子に由来するのか、X点なのかは実験だけでは判別できない。必ず理論計算による助けが必要となる。そこで、どの電子が最低準位にいるのかは、電子有効質量が異なるのでサイクロトロン共鳴を使えば一目瞭然になるだろう、というのが本研究の出発点である。

3．一巻コイル法超強磁場発生装置

サイクロトロン共鳴の実験結果に入る前に、本研究で用いた一巻コイル法と呼ばれる超強磁場発

生技術[8]について説明する。この手法で超強磁場を発生させて、物性測定ができる施設は世界中でも数箇所に限られる非常にユニークな手法である。

超伝導磁石が身近になって強磁場測定が容易になったが、今でも**100T**を超える磁場を作ろうとすると電磁石では難しく、破壊型磁場発生法に頼ることになる。破壊型磁場発生法の主なものには、火薬等を用いる爆縮法、電磁力により磁束を圧縮させる電磁濃縮法、それから、一巻コイル法がある。一巻コイル法は、図**3**に示すように高速放電が可能なコンデンサ・バンクに十分な電荷を充電しておき、銅板を丸めて作った一巻コイル（図**4**左側）に、一気に放電させることによって、コイル内に超強磁場を発生させる手法である。この手法の最大の特徴は、放電によりコイルが爆発的破壊を起こすが（図**4**右側)、コイル内に設置した実験試料が無傷で残ることである。他の破壊型磁場発生法では爆破とともに実験試料は木っ端微塵となるので、同一試料で繰り返して実験するには一巻コイル法しかない。ちなみに、手法としては古いもので**1957**年にカリフォルニア大学の**Furth**らがこの方法により**160T**を得たという報告[9]がある。これを物性測定で利用できるように技術開発を進めたのが三浦（東大物性研）と**Herlach**（ルーヴェン・カトリック大学、ベルギー）ら[10]である。今では、多少のトレーニングを受ければ大学院生でも**150T**の強磁場を用いた物性測定が出来るシステムとなっていて、東大物性研の共同利用施設となっている。近年、フンボルト大学（ベルリン、ドイツ）にも東大の装置をベースにした設備が置かれて物性研究に利用されている。

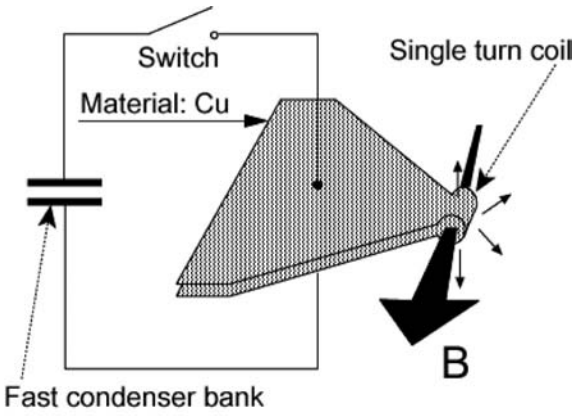

図**3**　一巻コイル法超強磁場発生の原理。放電速度の速いコンデンサ・バンクに充電された電荷を、一巻コイルに一気に放電させて超強磁場を得る。

図**4**　一巻コイルの放電前（左側）と放電後（右側）の写真。三角形状の先端に形づくられた小さなコイルが、放電によって吹き飛んでいる。

4．GaAs/AlAs超格子でのサイクロトロン共鳴

本題の**GaAs/AlAs**超格子の超強磁場サイクロトロン共鳴に戻ろう。

まず、実験に用いた測定系を図**5**に示す。鋼鉄製の頑丈な防護箱の中に一巻コイルが設置され、その左右にそれぞれレーザ光源と光検出器を配置する。磁場発生時には強烈な電磁ノイズが発生するので、光検出器は二重のシールドボックス内に置き、ボックス内で光信号に変換して光ファイバで測定室に信号を伝送する。そして、電磁シールドされた測定室にて光→電気信号に変換して記録する。また、測定に用いた試料は、本実験用にエピタキシャル構造を設計し、我々の研究室にて分

子線エピタキシー装置により結晶成長させたものである。

図 6 に得られた結果を示す。測定温度は約30Kで、用いた光はH_2Oレーザの23μmである。横軸に磁場強度、縦軸に透過率を取り、グラフは上から超格子の積層数が16から 8 へと少なくなっている。図中Aで示した位置が電子有効質量約$0.07m_0$に対応し、GaAs中のΓ点にいる電子による信号である。一方、Bは電子有効質量約$0.2m_0$でAlAsのX点における横有効質量に対応するものである。この図より、メインピークが n＝15 付近でAからBへ移り変わっていることが分かる。すなわち、超強磁場サイクロトロン共鳴測定の結果では、超格子の積層数 n＝15 付近でΓ－Xクロスオーバ現象が起きることが分かった。

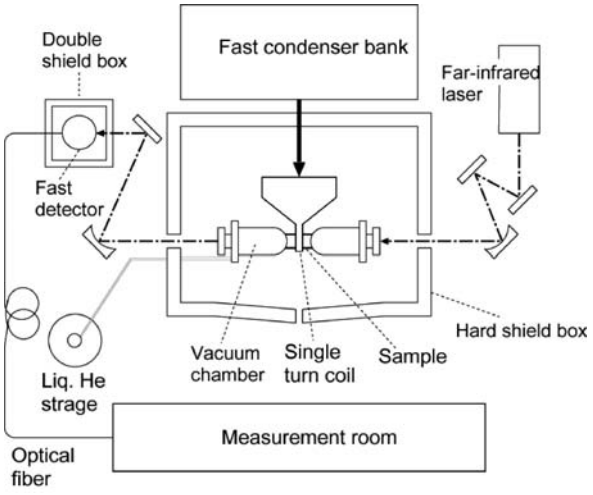

図 5　超強磁場サイクロトロン共鳴測定に用いた測定系。

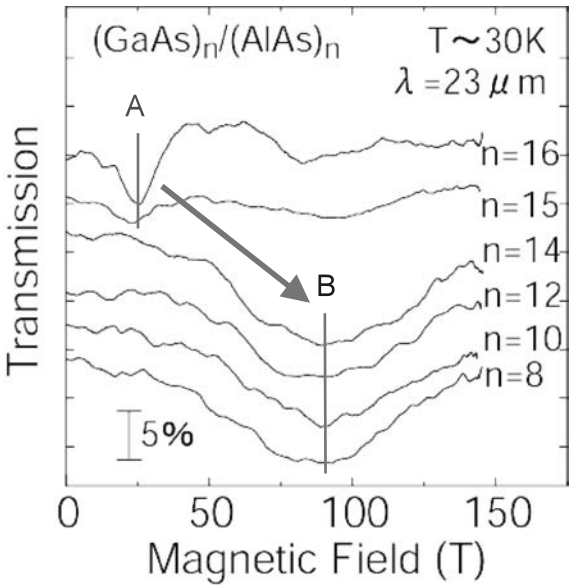

図 6　$(GaAs)_n/(AlAs)_n$超格子の超強磁場サイクロトロン共鳴の測定結果。試料温度は約30K、検出用の光レーザにはH_2Oレーザの波長23μmを用いた。

5．磁場によるΓ－Xクロスオーバ現象

GaAs/AlAs超格子におけるΓ－Xクロスオーバ現象は、光学測定では積層数 n＝12 で、超強磁場サイクロトロン共鳴測定では n＝15 付近で、と差が生じたが、これは磁場によるΓ－Xクロスオーバ現象で理解が出来る。

$(GaAs)_{15}/(AlAs)_{15}$超格子のΓ点とX点とに存在する電子が、磁場中でどのようなランダウ準位を形成しているのかを図 7 に示している。零磁場における各準位の位置は、先に示した強結合近似の計算結果で決めている。図中の太い矢印は、サイクロトロン共鳴の検出に用いた23μmに光

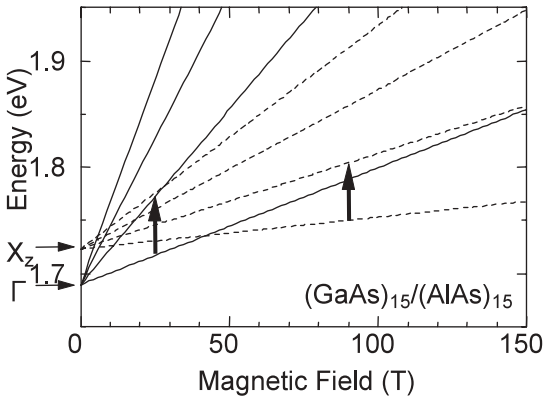

図 7　$(GaAs)_{15}/(AlAs)_{15}$超格子のΓ点とX点とが形成するランダウ準位の磁場強度依存性。矢印は波長23μmの光エネルギーによる吸収が起こる位置を示している。

に相当するエネルギー差がある部分を示している。すなわち、この矢印のある部分でサイクロトロン共鳴信号が得られることになり、低磁場領域ではΓ点、高磁場領域では**X**点での電子がサイクロトロン共鳴を起こすことが分かる。このように磁場の印加によって最低次のランダウ準位がΓ点から**X**点に移る現象を磁場によるΓ－**X**クロスオーバ現象と呼んでおり、我々の実験では、積層数変化によるΓ－**X**クロスオーバ現象と、磁場によるΓ－**X**クロスオーバ現象を同時に観測していたことになる。

6．まとめ

一巻コイル法超強磁場発生技術を用いたサイクロトロン共鳴測定により（**GaAs**)$_n$/(**AlAs**)$_n$超格子におけるΓ－**X**クロスオーバ現象について調べた。超強磁場サイクロトロン共鳴によりΓ－**X**クロスオーバ現象を確認し、積層数 **n＝15** でクロスオーバをしている結果を得た。この結果は、積層数の変化によるΓ－**X**クロスオーバ現象と、磁場によるΓ－**X**クロスオーバ現象を同時に観測したものであった。

謝辞

この研究は東京大学物性研究所の共同利用制度により実施されました。また、本研究は当時の三浦研究室（東大物性研）と濱口研究室（阪大工学部）の多くのスタッフ・学生らの協力の下で行われたことを付記します。

参考文献

［1］**L. Esaki and R. Tsu, IBM Research Note RC-2418（1969）.**

［2］**L. Esaki and R. Tsu, IBM J. Res. Develop.** 14（**1970**）**61.**

［3］**L. L. Chang, L. Esaki and R. Tsu, Appl. Phys. Lett.** 24（**1974**）**593.**

［4］**R. Dingle, W. Wiegmann and C. H. Henry, Phys. Rev. Lett.** 33（**1974**）**827.**

［5］**R. Dingle, A. C. Gossard and W. Wiegmann, Phys. Rev. Lett.** 34（**1975**）**1327.**

［6］**M. Nakayama, I. Tanaka, I. Kimura and H. Nishimura, Jpn. J. Appl. Phys.** 29（**1990**）**41.** 等

［7］**T. Matsuoka, T. Nakazawa, T. Ohya, T. Miyatake, M. Yamaguchi, K. Taniguchi and C. Hamaguchi, Surf. Sci.** 267（**1992**）**470.**

［8］**N. Miura, Physica B** 201（**1994**）**40.**

［9］**H. P. Furth, M. A. Levine and R. W. Waniek, Rev. Sci. Instrum.** 28（**1957**）**949.**

［10］**F. Herlach and N. Miura, High Magnetic Fields Science and Technology Vol.1 Magnet Thchnology and Experimental Techniques（World Scientific Publ., Singapore, 2003）p.235.**

用語説明

超強磁場

明確な定義はないが概ね**100T**を超える磁場強度を指す。**100T**＝**1MG**であるのでメガガウス領域とも呼ばれる。

超格子

基本単位格子より長い周期構造をもつ結晶格子を一般に超格子という。自然界では結晶形成時の自発的な作用で周期的な構造を持つ化合物があり自然超格子と呼ばれる。一方、分子線エピタキシー法などの結晶成長技術の進歩により人為的に異種の物質を交互に積み重ねるなどして周期構造を持たせたものを人工超格子と呼ぶ。

H_2Oレーザ

気体レーザの一種で水蒸気（水分子）の振動回転遷移で発振する分子レーザ。発振波長は**17**，**23**，**28**，**119**μ**m**など。光源の種類に乏しい遠赤外領域において貴重なレーザであり、古くから（レーザ発明直後の**1960**年頃から）使われている。