

理学博士植村泰忠君および理学博士安藤恒也君の「強磁場

下のMOS反転層における伝導現象の理論」(共同研究)に

対する授賞審査要旨

金属・酸化物・半導体の層状構造物をMOSと呼んでいる。半導体として(100)面をもつシリコン単結晶のp型半導体を取り、その片面を酸化して、その上に電極をつけた場合が代表的である。半導体を接地し、金属に電圧をかけると、p型半導体の場合には、正の電圧がある値をこえるとき、半導体内の酸化物に接した所にうすい電子層ができる。この電子層を反転層と呼ぶ。負電圧のときは正孔の蓄積層ができる。n型半導体の場合は逆である。反転層または蓄積層の二次元電荷密度は電圧とともにほぼ直線的に変る。また半導体にバイアスをかけることによって、電荷密度を一定に保ちながら金属・半導体間の電圧をかえることもできる。

このようなMOSあるいは類似のもの(例えばGaAs-Ga_{1-x}Al_xAsのヘテロ構造物)は、トランジスタその他のデバイスとして開発されているが、他方、反転層(あるいは蓄積層)の二次元的な電子系の性質について多大な興味

が持たれ、過去一五年間にわたって歴大な研究がなされた。反転層の電子は、層に垂直な方向の運動が量子化されていて、それに応じて離散レベルができています。層に平行な方向には電子は自由に運動するため、各離散レベルに附属して二次元サブバンドができています。温度が低く、電子密度が 10^{12}cm^{-2} の程度以下である場合には、最低のサブバンドのみに電子が存在する。このような場合の電子系の性質の研究、とりわけ伝導現象の研究は、MOS 研究の中心的な課題であった。

植村君と安藤君の研究はこの中心問題を理論的に解明したものである。特に、電子系の二次元性が明瞭に現われる強磁場下の伝導現象に研究の重点が置かれた。その研究題目はおよそ次のように分類される。(1)強磁場下の静的な伝導現象、(2)強磁場下の動的な伝導現象、特にサイクロトロン共鳴、(3)サブバンド構造と光吸収。このうち、(1)は植村君とその数名の門下生(特に安藤君)によって研究され、のち安藤君によって詳細に補足された。(2)は植村君と安藤君によって始められ、安藤君によって細部にいたるまで完成されたものである。(3)は主として安藤君による。なお、これらの理論の発展は実験観測とのからみ合いの中でなされたものである。特に(1)については川路紳治の精密な実験が強く関連した。以下、各項目を概説する。

(1) 反転層内の電子の自由運動は散乱体によって妨げられている。この散乱体は、酸化物中および酸化物と半導体の界面に存在する電荷、界面の原子スケール程度の粗さ、反転層中の不純物原子などである。磁場が反転層に垂直にかけられたとき、電子は円軌道を描くが、散乱によって円運動は有限寿命をもち、円の中心は移動する。円運動は量子化されていて、エネルギー間隔が $\hbar\omega_c = \hbar eH/mc$ (H は磁場の強さ) のランダウ・レベルができています。 ω_c は

円運動の角速度である。散乱は各ランダウ・レベル内のサブレベル間の遷移に当る。有限寿命に相当してランダウ・レベルに幅ができる。植村・安藤君は散乱を自己無撞着ボロン第一近似という方法を考案してこれを扱い、同時に各ランダウ・レベルの拡がりを決定した。そのとき、レベル幅がレベル間隔に比して十分に小さい、従って磁場が十分に大きい (100 kOe のオーダー) と仮定した。ついで、久保公式に従い、グリーン関数法を適用して伝導率を計算した。伝導率としては、反転層は平行に x 軸と y 軸をとったとき、 x 方向の電場による x 方向の電流を与える横伝導率 $\sigma_{xx} (= \sigma_{yy})$ と、 x 方向の電場によって y 方向におきる電流を与えるホール伝導率 $\sigma_{yx} (= -\sigma_{xy})$ がある。この両方が計算されたのであるが、後に安藤君は高次ボロン散乱および多重散乱の効果を詳細に検討した。

得られた著しい結果を述べる。まず電子密度を増して行くと、電子の最高エネルギーを表わすフェルミ・レベルが、隣り合うランダウ・レベルの中間に来れば σ_{xx} はゼロになり、フェルミ・レベルがランダウ・レベルの中央を過ぎるときには σ_{xx} は極大値をとる。その極大値は散乱体の濃度や磁場の強さに依らず $(e^2/h)(N + \frac{1}{2})$ となる (N はそのランダウ・レベルの番号で $N = 0, 1, 2, \dots$)。ただし、散乱体が短距離性であると仮定した。長距離性のあるときは極大値は小さくなるが、しかし後に安藤君は、長距離性の場合でも、ランダウ・レベルの中央においては、多体効果による遮蔽のために、それが短距離性になりうることを示した。次に σ_{yx} は、 $\sigma_{xx} = 0$ のときに極大値をとって、その値は $N e^2 / 2\pi h$ となり (N はみたされたランダウ・レベルの数)、 σ_{xx} が極大であるときには極小になる。これらはすべて実験事実をよく説明する結果であった。

なお、 σ_{xx} の相つづくピークには分裂がみられる。これは交換相互作用を含むゼーマン分裂と、 (100) の場合には

さらにブリルアン・ゾーン内の二つのポテンシャルの谷による谷分裂であることが示された。

(2) 周波数 ω の振動電場があるとき、 ω 依存の伝導率 $\sigma_{zz}(\omega)$ を久保公式によって求めることが問題である。これの実数部分から電波の吸収率がえられる。安藤君は、(1)の計算を拡張し、電子間相関をもとり入れた。実験は遠赤外域でなされ、 ω を一定に保ち、磁場 H をかえて、前出の $\sigma_{zz} = e^2 H / mc$ (サイクロトロン周波数) が ω を過ぎるようになる。このとき共鳴吸収が観測される。安藤君が計算した吸収曲線は、実験によって詳細にいたるまで検証された。特に、予言された subharmonics $\omega_0/\omega = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots$ の構造がみごとに観測されている。

(3) サブバンドの計算は多くの人によってなされたが、密度汎関数法を用いた安藤君の計算は最も精密なものである。さらに安藤君は、サブバンド間の遷移を表わす赤外光吸収の強度曲線を計算した。これは反転層に垂直な伝導率 $\sigma_{zz}(\omega)$ の計算である。このとき、電子間クーロン相互作用の他、密度汎関数法に現われる交換・相関相互作用が重要である。磁場が存在しないとき、また強磁場が存在してその方向が変えられたときの計算は、いずれも観測の複雑な吸収曲線を正確に再現した。

以上の理論研究は MOS 反転層 (および蓄積層) の二次元電子系の基本問題を解決したものであり、国際的に高い評価をえているものである。なお、近年 (1) の問題において変革が起きている。川路紳治は、純度の高いシリコン試料では、電子密度が変化する有限幅の域において σ_{zz} がゼロになること、即ち各ランダウ・レベルのすそにおいて電子の局在化が起きていることを見出した。じつじつ von Klitzing h/e^2 がゼロまたはほとんどゼロの値をとる広い範囲で σ_{zz} が高い精度において一定値 $Ne^2/2\pi h$ をとることを観測した (量子ホール効果)。以前の植村君らの論文

たもこれたかたのいごが記われているが、十分ではなかった。現在のこの問題をめぐって多数の理論が提出され、安藤君も有力な提出者の一人である。また新しい実験結果も次々に出されている。しかし問題の解決は将来に残されている。

1' 半導体論文目録

1. Y. Uemura, Y. Matsumoto, "An analysis for anomalous galvanomagnetic effects in surface inversion layer of semiconductors," Proc. 2nd Conf. on Solid State Device, Suppl. to J. Japan Soc. Appl. Phys. 40, 205 (1971).
2. T. Ando, Y. Matsumoto, Y. Uemura, M. Kobayashi, K. F. Komatsubara, "Transverse magnetoconductivity of a two-dimensional electron gas", J. Phys. Soc. Japan 32, 859 (1972).
3. T. Ando, Y. Matsumoto, Y. Uemura, "Theory of quantum galvanomagnetic effects in the inversion layer of semiconductors," Proc. 11th Intern. Conf. on the Phys. of Semiconductors, Warsaw, 294 (1972).
4. Y. Uemura, "Landau levels and electronic properties of semiconductor interface," Japan. J. Appl. Phys. Suppl. 2-2, 12 (1974).
5. Y. Uemura, "Quantum galvanomagnetic phenomena in MOS inversion layer," Proc. 12th Intern. Conf. on the Phys. of Semiconductors, Stuttgart, 665 (1974).
6. T. Ando, Y. Uemura, "Theory of quantum transport in a two-dimensional electron system under strong magnetic fields, I. Characteristics of level broadening and transport under strong magnetic fields," J. Phys. Soc. Japan 36, 959 (1974).

7. T. Ando, "Theory of quantum transport in a two-dimensional electron system under magnetic fields, II. Single-site approximation under strong fields," *J. Phys. Soc. Japan* **36**, 1521 (1974).
8. T. Ando, "Theory of quantum transport in a two-dimensional electron system under magnetic fields, III. Many-site approximation," *J. Phys. Soc. Japan* **37**, 622 (1974).
9. T. Ando, "Theory of quantum transport in a two-dimensional electron system under magnetic fields, IV. Oscillatory conductivity," *J. Phys. Soc. Japan* **37**, 1233 (1974).
10. T. Ando, Y. Uemura, "Theory of oscillatory g -factor in an MOS inversion layer under strong magnetic fields," *J. Phys. Soc. Japan* **37**, 1044 (1974).
11. T. Ando, Y. Uemura, "Oscillation of effective g -factor in an MOS inversion layer under strong magnetic fields," *Japan J. Appl. Phys. Suppl.* **2-2**, 329 (1974).
12. Y. Matsumoto, Y. Uemura, "Scattering mechanism and low temperature mobility of MOS inversion layers," *Japan. J. Appl. Phys. Suppl.* **2-2**, 367 (1974).
13. F. J. Ohkawa, Y. Uemura, "Quantized surface states of a narrow gap semiconductor," *Japan. J. Appl. Phys. Suppl.* **2-2**, 355 (1974).
14. F. J. Ohkawa, Y. Uemura, "Quantized surface states of a narrow gap semiconductor," *J. Phys. Soc. Japan* **37**, 1325 (1974).
15. T. Ando, Y. Uemura, "Theory of cyclotron resonance line shape in MOS inversion layers," *Proc. 12th Intern. Conf. on Phys. of Semiconductors, Stuttgart*, 724 (1974).
16. T. Ando, "Theory of cyclotron resonance lineshape in a two-dimensional electron system," *J. Phys. Soc. Japan* **38**, 989 (1975).

17. T. Ando, Y. Matsumoto, Y. Uemura, "Theory of Hall effect in a two-dimensional electron system," *J. Phys. Soc. Japan* **39**, 279 (1975).
18. T. Ando, "Subband structure of an accumulation layer under strong magnetic fields," *J. Phys. Soc. Japan* **39**, 411 (1975).
19. F. J. Ohkawa, Y. Uemura, "Hartree approximation for the electronic structure of a p-channel inversion layer of silicon MOS," *Progr. Theor. Phys. Suppl.* **57**, 165 (1975).
20. T. Ando, "Density-functional calculation of subband structure on semiconductor surfaces," *Surface Sci.* **58**, 128 (1976).
21. Y. Uemura, "Theoretical considerations on quantization for carriers in MOS structures," *Proc. Intern. Conf. on Electronic Properties of Quasi-two-dimensional Systems*, Providence, *Surface Sci.* **58**, 1 (1976).
22. F. J. Ohkawa, Y. Uemura, "Valley splitting in an n-channel (100) inversion layer on p-type silicon," *Surface Sci.* **58**, 254 (1976).
23. T. Ando, "Density-functional calculation of subband structure in accumulation and inversion layers," *Phys. Rev.* **B13**, 3468 (1976).
24. T. Ando, "Lineshape of inter-subband optical transitions in space charge layers," *Z. Phys.* **B24**, 33 (1976).
25. T. Ando, "Quantum transport in an anisotropic two-dimensional system under strong magnetic fields," *Z. Phys.* **B24**, 219 (1976).
26. T. Ando, "Mass enhancement and subharmonic structure of cyclotron resonance in an interacting

- two-dimensional electron gas," *Phys. Rev. Lett.* **36**, 1383 (1976).
27. Y. Takada, Y. Uemura, "Acoustic plasmon and possibility of superconductivity in MOS structures," *Proc. 13th Intern. Conf. Phys. Semiconductors*, Rome, 754 (1976).
 28. A. Darr, J. P. Kotthaus, T. Ando, "Spin resonance in an inversion layer on InSb," *Proc. 13th Intern. Conf. Phys. Semiconductors*, Rome, 774 (1976).
 29. T. Ando, "Quantum transport and electron-electron interactions in a two-dimensional electron system under strong magnetic fields," *Proc. Intern. Conf. Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics*, Würzburg, 33 (1976).
 30. Y. Uemura, "Immobile carriers in Landau levels of MOS inversion layers," *Lecture notes*, Intern. Conf. Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics, Würzburg, 81 (1976).
 31. F. J. Ohkawa, Y. Uemura, "Theory of valley splitting in an n-channel inversion layer of Si, I. Formation by extended zone effective mass theory," *J. Phys. Soc. Japan* **43**, 907 (1977).
 32. F. J. Ohkawa, Y. Uemura, "Theory of valley splitting in an n-channel inversion layer of Si, II. Electronic break-through," *J. Phys. Soc. Japan* **43**, 917 (1977).
 33. F. J. Ohkawa, Y. Uemura, "Theory of valley splitting in an n-channel inversion layer of Si, III. Enhancement of splittings by many-body effects," *J. Phys. Soc. Japan* **43**, 925 (1977).
 34. Y. Takada, Y. Uemura, "Subband structures of n-channel inversion layers on III-V compounds—A possibility of the gate controlled Gunn effect," *J. Phys. Soc. Japan* **43**, 139 (1977).
 35. T. Ando, "Inter-subband optical transitions in a surface space-charge layer," *Solid State Commun.* **21**, 133 (1977).

36. T. Ando, "Inter-subband optical absorption in space-charge layers on semiconductor surfaces," *Z. Phys. B26*, 263 (1977).
37. T. Ando, "Inter-subband optical absorption in an inversion layer on a semiconductor surface in magnetic fields," *Solid State Commun.* **21**, 801 (1977).
38. T. Ando, T. Eda, M. Nakayama, "Optical absorption in surface space-charge layers of anisotropic and tilted valley systems," *Solid State Commun.* **23**, 751 (1977).
39. T. Ando, "Screening effect and quantum transport in a silicon inversion layer in strong magnetic fields," *J. Phys. Soc. Japan* **43**, 1616 (1977).
40. T. Ando, "Subband structure and inter-subband absorption in an accumulation layer in strong magnetic fields," *J. Phys. Soc. Japan* **44**, 475 (1978).
41. T. Ando, "Broadening of inter-subband transitions in image-potential-induced surface states outside liquid helium," *J. Phys. Soc. Japan* **44**, 765 (1978).
42. Y. Takada, T. Ando, "Stress effects on electronic properties of silicon inversion layers," *J. Phys. Soc. Japan* **44**, 905 (1978).
43. T. Ando, "Theory of magnetoplasmon resonance lineshape in the silicon inversion layer," *Solid State Commun.* **27**, 895 (1978).
44. N. Uchimura, Y. Uemura, "Hot electron effects in Landau levels of MOS inversion layers," *Proc. 14th Intern. Conf. Phys. Semiconductors, Edinburgh*, 331 (1978).
45. N. Uchimura, Y. Uemura, "Hot electron effects in Landau levels of MOS inversion layers," *J. Phys. Soc. Japan* **47**, 1417 (1979).

46. T. Ando, "Theory of intersubband-cyclotron combined resonance in the silicon accumulation layer," Proc. 14th Intern. Conf. Phys. Semiconductors, Edinburgh, 1219 (1978).
47. T. Ando, "Electron-electron interaction and electronic properties of space-charge layers on semiconductor surfaces," Surface Sci. **73**, 1 (1978).
48. T. Ando, "Theory of intersubband-cyclotron combined resonance in the silicon space-charge layer," Phys. Rev. **B19**, 2106 (1979).
49. T. Ando, "Valley splitting in the silicon inversion layer: Misorientation effects," Phys. Rev. **B19**, 3089 (1979).
50. S. Mori, T. Ando, "Intersubband scattering effects on the mobility of a Si (100) inversion layer at low temperatures," Phys. Rev. **B19**, 6433 (1979).
51. T. Ando, "Minigap and transport in a two-dimensional electron system," J. Phys. Soc. Japan **47**, 1595 (1979).
52. T. Ando, S. Mori, "Electronic properties of semiconductor superlattice, I. Self-consistent calculation of subband structure and optical spectra," J. Phys. Soc. Japan **47**, 1518 (1979).
53. S. Mori, T. Ando, "Electronic properties of semiconductor superlattice, II. Low temperature mobility perpendicular to the superlattice," J. Phys. Soc. Japan **48**, 865 (1980).
54. T. Ando, "Valley splitting and related phenomena in Si inversion layers," Surface Sci. **98**, 327 (1980).
55. S. Mori, T. Ando, "Electronic properties of a heavily doped n-type GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs superlattice," Surface Sci. **98**, 101 (1980).
56. T. Ando, "Many-body effects in the space charge layers," Proc. 15th Intern. Conf. Phys. Semicon-

- ductors, Kyoto (1980), *J. Phys. Soc. Japan* **49**, Suppl. A, 929 (1980).
57. Y. Takada, K. Arai, N. Uchimura, Y. Uemura, "Theory of the electronic properties of n-channel inversion layers on narrow-gap semiconductors, I. Subband structure of InSb," *J. Phys. Soc. Japan* **49**, 1851 (1980).
58. Y. Takada, K. Arai, N. Uchimura, Y. Uemura, "Theory of the electronic properties of n-channel inversion layers on narrow-gap semiconductors," *Proc. Intern. Conf. Phys. Semiconductors, Kyoto (1980)*, *J. Phys. Soc. Japan* **49**, Suppl. A, 947 (1980).
59. T. Ando, "Magnetic quantization and transport in a semiconductor superlattice," *Oji Intern. Seminar, Hakone: Physics in High Magnetic Fields*, 301 (1980).
60. T. Ando, "Electronic properties of a semiconductor superlattice, III. Energy levels and transport in magnetic fields," *J. Phys. Soc. Japan* **50**, 2978 (1981).
61. H. Aoki, T. Ando, "Effect of localization on the Hall conductivity in the two-dimensional system in strong magnetic fields," *Solid State Commun.* **38**, 1079 (1981).
62. T. Ando, A. B. Fowler, F. Stern, "Electronic properties of two-dimensional systems," *Rev. Mod. Phys.* **54**, 437-672 (1982).