

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	Annisa Noorhidayati	提出年	令和 2 年
学位論文の 題目	Resistively-detected Nuclear Magnetic Resonance in a Confined GaAs/AlGaAs Structure (閉じ込められた GaAs/AlGaAs 構造における抵抗検出核磁気共鳴)		

論文目次

1. Introduction
2. Physics of Low Dimensional Semiconductor
3. Confined GaAs/AlGaAs System: Fabrication of Quantum Point Contact
4. Quantum Point Contact (QPC): Transport characteristic in a confined 2DEG
5. Resistively-detected NMR (RDNMR)
6. Resistively-detected NMR (RDNMR) in triple-gate quantum point contact: magnetic-field dependence
7. RDNMR in higher Landau level
8. Scattering and Tunneling at Fractional Quantum Hall Regime
9. Conclusion
10. Appendices

Abstract

I. INTRODUCTION

NMR is a powerful spectroscopic tool and widely used in physics studies. However, the detection of conventional NMR is inapplicable to nanostructures with a small ensemble of nuclear spin, such in a GaAs based quantum point contact (QPC). A more susceptible technique namely resistively detected-NMR (RDNMR) can help us to circumvent the limitation. QPC can be exploited as a tunable spin filter device. The QPC constriction is created typically by imprinting a saddle-like electrostatic potential on a two dimensional electron gas (2DEG). Within the QPC, for instance, two separated chiral spin edge channels can be brought closer, allowing spin flip scattering to occur. In the presence of hyperfine interaction, the spin flip scattering provides a way to polarize an ensemble of nuclear spins in the QPC. The polarization of as small as 10^7 nuclear spins can be sensitively readout through the conductance change in the spin-resolved regime.

We divide the work into three separate sections to distinguish each own result clearly, but otherwise the subjects are interrelated and fall into a larger theme of hyperfine-mediated transport.

II. DEVICE AND METHODS

We carry out the measurement on a triple gate QPC, consisting of a pair of split metal gates with additional center gate in between. We use a high quality 20-nm wide GaAs quantum well. The low temperature electron mobility is $\mu = 1.47 \times$

$10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ at an electron density $n_s = 1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. An ac current $I_{AC} = 1 \text{ nA}$ (10 nA) is applied for transport (RDNMR) measurements. We put the sample inside a dry dilution refrigerator with an electron temperature of about 300mK for RDNMR detection in integer filling factor ($\nu_b, \nu_{qpc} = 2, 1$) and at 100 mK for a more fragile filling factor combination. The diagonal voltage V_D is measured using a phase-locked lock-in amplifier. Prior to the RDNMR measurement, the nuclear spins are polarized via current induced-dynamic nuclear polarization (DNP) by applying $I_{AC} = 10 \text{ nA}$ for 1000 s. Then radiofrequency (rf) with -30dBm power is swept through ^{75}As Larmor frequency at a sweep rate of 100 Hz/s.

III.MAGNETIC FIELD DEPENDENCE OF RDNMR DETECTED AT LOWEST LL

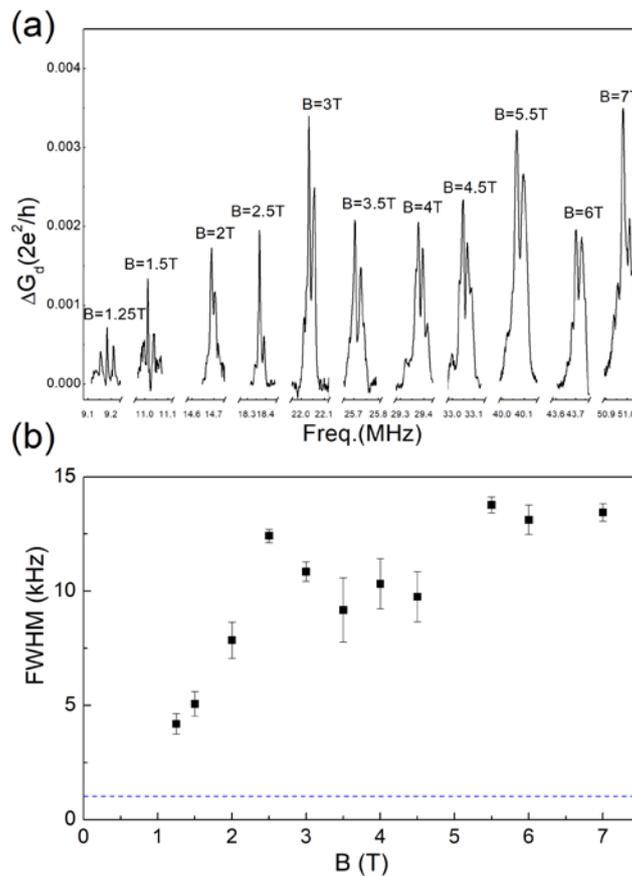


Fig 1. (a) RDNMR signals of the high-mobility and low-mobility devices measured at $\nu_{qpc} < 1$ with magnetic-field variation. The strain around the QPC structure increases the quadrupolar fields, resulting in a threefold degeneracy spectrum for all the RDNMR signals. (b) FWHM of RDNMR central transition (CT) shows dependency on the magnetic field in the lower magnetic field and saturate at a higher magnetic field. Blue dashed line at 1 kHz corresponds to GaAs nuclear dipole interaction.

We systematically test the condition limiting the observability of the RDNMR signal, under the simplest possible condition where the lowest LL alone ($N = 0$) was occupied. The electron density in a quantum well is adjusted by applying the back-gate bias (V_{BG}) to maintain this condition for all the given magnetic fields. We decrease the magnetic field and observe the changes in the RDNMR signal. By doing so, we can track the evolution of RDNMR spectra from high to the lowest possible magnetic field. As the RDNMR-signal shape and strength are sensitive to the detection point,

we carefully select the RDNMR detection point at around the same value of $\nu_{\text{qpc}} < 1$. In the presence of positive nuclear spin polarization, RDNMR signal observed as conductance peak, summarized in Fig. 1(a).

All RDNMR signals exhibit threefold degeneracy spectra with the separation between each peak at $\Delta f \approx 20$ kHz raised due to electric field gradient (EFG) induced-quadrupole interaction, which is independent of the field. Interestingly, the central NMR linewidths vary with the field strength as shown in Fig. 1(b). Below $B = 3$ T, the linewidth decreases in proportion with the field, reflecting contributions of the Knight-shifts, and approach a lower limit of 1 kHz corresponding to the GaAs nuclear dipole interaction. In a higher magnetic field, FWHM saturated at around 13 kHz, suggesting the contribution of Coulomb interaction [1].

IV. RDNMR DETECTION AT HIGHER LLs

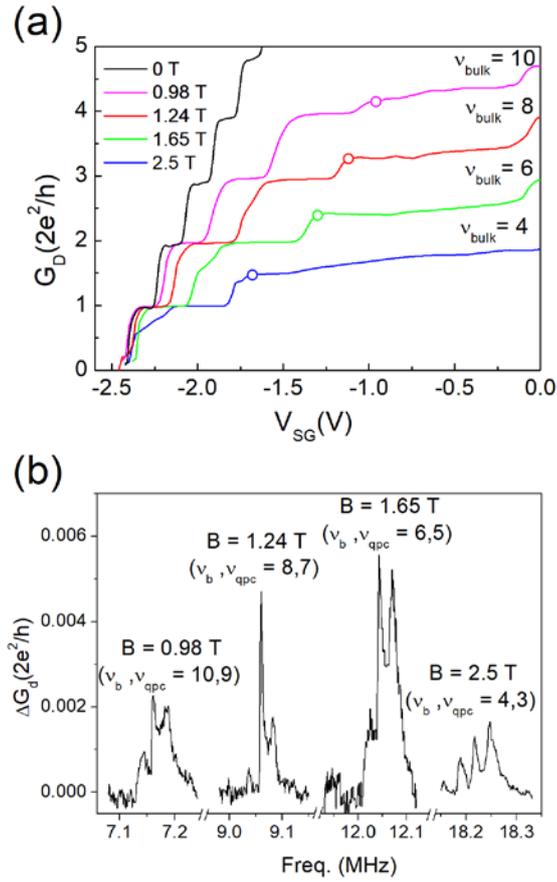


Fig 2. (a) Diagonal conductance G_D as a function of split gate bias voltage measured at several perpendicular magnetic fields. The open circles indicate the RDNMR detection point at higher LL. (b) RDNMR spectra measured as conductance peaks at different ν_b, ν_{qpc} combination.

To further push the detection limit of NMR in a QPC in a bid to preserving the spin degeneracy of the lowest 1D subband level, we demonstrate local generation and detection of nuclear spin polarization operating at higher LLs as displayed in Fig. 2(a) [2]. We detect conductance peak as expected from our understanding of inter-edge channel spin scattering in RDNMR detection. Through this approach, we manage to push the detection limit down to $B = 0.98$ T. Our developed NMR technique can potentially work at even lower perpendicular magnetic fields and/or elevated

temperatures by employing a higher mobility device and a lower 2DEG density. We believe this work would open a way to study 1D electronic states such as the 0.7 anomalous conductance near zero magnetic field via nuclear spin relaxation rate and Knight shift measurements. Those measurements are currently underway.

V. RDNMR DETECTION AT FQHE REGIME

We then expand our study to another interesting phenomenon that can be observed in the high-magnetic regime: the fractional quantum hall effect (FQHE). At a high magnetic field, it is safe to assume that the electron spin is fully polarized and so does the current-carrying edge channel. In this case, we expect the spin flip scattering, responsible for DNP and NMR signal, to be absent. To examine this hypothesis, we set the bulk filling to $\nu_b = 1$ at a field of 12 T and the point contact filling to $\nu_{\text{qpc}} = 2/3$. However contrary to our expectation, we observe current-induced RDNMR signal as displayed in Fig. 3(a) at both flank of $\nu_{\text{qpc}} = 2/3$ with different signal polarity. We observe a conductance dip for $\nu_{\text{qpc}} > 2/3$ but it gets reversed when the filling factor is reversed to $\nu_{\text{qpc}} < 2/3$. Moreover, the central transition is Knight shifted with increasing a negative voltage to the split gates as indicated by the dashed line in Fig. 3(a).

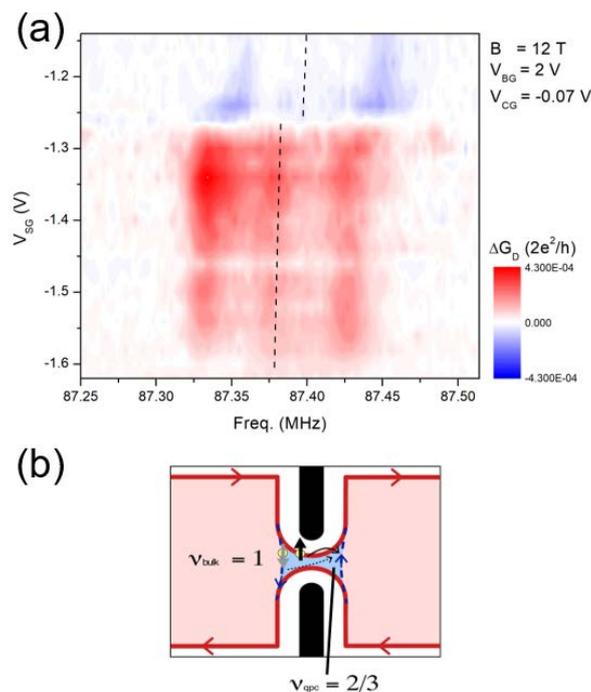


Fig 3. (a) RDNMR signal measured with $\nu_b, \nu_{\text{qpc}} = 1, 2/3$ combination. (b) Illustration of the corresponding edge channel.

Our result suggests that the actual edge channel could be much more complex and we could not treat the spin to be always fully polarized as in the current existing theoretical model.

References:

- [1] [A. Noorhidayati et. al.](#), PRB **101**, 035425 (2020).
- [2] [M. H. Fauzi, A. Noorhidayati, et. al](#), PRB **97**, 201412(R) (2018).

論文審査の結果の要旨

GaAs（砒化ガリウム）をベースにした高品質メゾスコピック構造は、低次元構造における輸送特性を研究する格好の材料であり、その中でも重要なメゾスコピック構造である量子ポイントコンタクト（QPC）はその中核をなしている。しかし、その単純な構造である QPC における伝導特性には未解明な部分も多く、新しい物性が次々と発見されている。NOORHIDAYATI, Annisa 氏提出の学位論文は、所属研究グループにおいて継続的に研究してきた抵抗検出核磁気共鳴（RDNMR）を QPC 構造に応用することで、QPC 構造における RDNMR の特性と電子スピン物性を明らかにしようとしたものである。特に、バックゲートで全体の電子密度を調整し、センターゲートでチャンネル部分の電子密度、さらには閉じ込めポテンシャル形状を精密に制御できる QPC を作製し、その RDNMR 特性を丁寧に測定したところに特徴がある。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

はじめに、QPC におけるエッジチャンネルのスピン散乱が最も明確に現れる QPC の両側が充填率 2、QPC の内部が充填率 1 の組み合わせで、QPC 内での核スピンの動的偏極、ならびに RDNMR を観測した。その結果、RDNMR 信号はコンダクタンスのピークとして得られ、その磁場依存性から 1.25T の低次場域まで RDNMR が観測できること、さらに、移動度の異なる QPC での特性の比較から、スピン状態の異なるエッジチャンネルの分離が RDNMR を測定するための必要条件になることを明らかにした。また、歪による四重極分離などの影響がない中央のピークの半値幅の磁場依存性に着目することで、低磁場域では QPC 内の電子密度の増加に対応したナイトシフトによる半値幅の磁場に比例する増加を確認する一方、高磁場域ではその増大が飽和することを明らかにし、電子間相互作用の効果を示唆する結果を得ることに成功した。

さらに、ゼロ磁場で出現する 0.7 構造の RDNMR を用いた研究の実現を目指し、QPC の両側を充填率 $2N$ の偶数、QPC の内部を充填率 $2N-1$ の奇数（ N はランダウレベルの次数）にして、1 T 以下での核スピンの動的偏極と RDNMR の観測を行った。その結果、0.98T で測定された $N=5$ の場合には、QPC のピンチオフ近傍でゼロ磁場とほぼ同じ伝導特性を得ることに成功し、ポンプ・プローブ法を使用することで 0.7 構造の RDNMR 測定ができる可能性を示した。

最後に、QPC の RDNMR を分数量子ホール効果領域に拡張するため、QPC の外側が充填率 1、内部が充填率 $2/3$ の状態で測定を行い、微細な充填率の変化に対してコンダクタンスの谷から山に変わる RDNMR 信号を 11T を超える強磁場で観測した。良く知られている充填率 $2/3$ におけるスピン転移に伴うバルクの RDNMR はこの磁場では観測されないため、得られた成果は電子スピンの完全偏極していると考えられる強磁場でも、ミクロスコピックな $2/3$ 領域を経由する伝導にスピン自由度が寄与していることを示している。ミクロスコピックな分数領域のエッジ状態に関しては多くの議論があり、今後、RDNMR 信号によるエッジ状態の研究の展開が期待できる。さらに、RDNMR には直接関係しないが、新しい統計に従う偶数分母の量子状態に対応する明瞭な $3/2$ 状態が、センターゲート付き QPC で出現することも確認した。

本論文は 9 つの章から成る。第一章の序論に続き、第二章で半導体低次元構造の概要を説明している。QPC の RDNMR 測定に向けた準備として、第三章で GaAs 系 QPC の作製、第四章で QPC の伝導特性、第五章で RDNMR について述べた後、第六章で基底ランダウレベルでの RDNMR が議論され、第七章では高次のランダウレベルを用いたときの RDNMR が議論されている。第八章では RDNMR の研究を QPC 内部の充填率が分数の場合に拡張し、特異な分数である $3/2$ が QPC で出現することにも触れている。第九章では得られた結果をまとめている。

以上の内容は、自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、NOORHIDAYATI, Annisa 氏提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。