

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4341013号
(P4341013)

(45) 発行日 平成21年10月7日(2009.10.7)

(24) 登録日 平成21年7月17日(2009.7.17)

(51) Int.Cl. F I
H O I S 1/02 (2006.01) H O I S 1/02

請求項の数 12 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2003-298003 (P2003-298003)	(73) 特許権者	503360115 独立行政法人科学技術振興機構 埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(22) 出願日	平成15年8月21日(2003.8.21)	(74) 代理人	100082876 弁理士 平山 一幸
(65) 公開番号	特開2005-72153 (P2005-72153A)	(72) 発明者	小宮山 進 東京都世田谷区弦巻2-18-20 パー クシティ弦巻101
(43) 公開日	平成17年3月17日(2005.3.17)	(72) 発明者	生嶋 健司 神奈川県川崎市麻生区上麻生2-29-8
審査請求日	平成17年12月19日(2005.12.19)	(72) 発明者	佐久間 寿人 東京都目黒区駒場1-32-26-402
		審査官	傍島 正朗

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 遠赤外発光素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

固体材料中に作製した静磁場中二次元キャリア系と、この二次元キャリア系に形成したチャンネルと、このチャンネルを横断して設けた第1のゲート電極と、上記チャンネルに電流を供給するソース及びドレイン電極とを有し、

上記二次元キャリア系を量子ホール状態に設定すると共に上記第1のゲート電極に電圧を印加して、エッジチャンネル間に非平衡キャリア分布を形成し、且つこのエッジチャンネル間の化学ポテンシャル差が、ランダウ準位間のエネルギー差以上になる電位差を、上記ソース及びドレイン電極間に印加することにより、上記エッジチャンネル間にキャリアの反転分布を形成し、この反転分布により遠赤外発光することを特徴とする遠赤外発光素子。

10

【請求項2】

前記チャンネルのチャンネル端に沿って設けた第2のゲート電極を有し、発光効率を高めることを特徴とする、請求項1に記載の遠赤外発光素子。

【請求項3】

前記チャンネルはコルビノ型チャンネルであり、発光効率を高めることを特徴とする、請求項1又は2に記載の遠赤外発光素子。

【請求項4】

前記チャンネルは、棒状のチャンネルを多数回折り返したジグザグ型チャンネルであり、且つこのジグザグ型チャンネルの両端が接続されており、単位面積あたりの発光強度を高めることを特徴とする、請求項1又は2に記載の遠赤外発光素子。

20

【請求項 5】

固体材料中に作製した静磁場中二次元キャリア系と、この二次元キャリア系に形成したチャンネルと、このチャンネルのチャンネル端に沿って設けたゲート電極と、上記チャンネルに電流を供給するソース及びドレイン電極とを有し、

上記二次元キャリア系を量子ホール遷移状態に設定すると共に、エッジチャンネルとバルクチャンネル間の化学ポテンシャル差がランダウ準位間のエネルギー差以上になる電位差を上記ソース及びドレイン電極間に印加してキャリアの反転分布を形成し、且つ上記ゲート電極に電圧を印加して、発光効率を高めることを特徴とする、遠赤外発光素子。

【請求項 6】

前記チャンネルはコルビノ型チャンネルであり、発光効率を高めることを特徴とする、請求項 5 に記載の遠赤外発光素子。 10

【請求項 7】

前記チャンネルは、棒状のチャンネルを多数回折り返したジグザグ型チャンネルであり、且つこのジグザグ型チャンネルの両端が接続されており、単位面積あたりの発光強度を高めることを特徴とする、請求項 5 又は 6 に記載の遠赤外発光素子。

【請求項 8】

固体材料中に作製した静磁場中二次元キャリア系と、この二次元キャリア系に形成したチャンネルと、このチャンネルを横断して設けた第 1 のゲート電極と、上記チャンネルに電流を供給するソース及びドレイン電極とを有し、

上記二次元キャリア系を量子ホール遷移状態に設定すると共に上記第 1 のゲート電極に電圧を印加し、且つこのエッジチャンネル間の化学ポテンシャル差が、ランダウ準位間のエネルギー差以上になる電位差を、上記ソース及びドレイン電極間に印加することにより、上記エッジチャンネル間にキャリアの反転分布を形成し、この反転分布により遠赤外発光することを特徴とする、遠赤外発光素子。 20

【請求項 9】

前記チャンネルのチャンネル端に沿って設けた第 2 のゲート電極を有し、発光効率を高めることを特徴とする、請求項 8 に記載の遠赤外発光素子。

【請求項 10】

前記チャンネルはコルビノ型チャンネルであり、発光効率を高めることを特徴とする、請求項 8 又は 9 に記載の遠赤外発光素子。 30

【請求項 11】

前記チャンネルは、棒状のチャンネルを多数回折り返したジグザグ型チャンネルであり、且つこのジグザグ型チャンネルの両端が接続されており、単位面積あたりの発光強度を高めることを特徴とする、請求項 8 又は 9 に記載の遠赤外発光素子。

【請求項 12】

前記固体材料中に作製した静磁場中二次元キャリア系に印加する磁場の強度を調整することにより、発光波長を調整することを特徴とする、請求項 1 ~ 11 のいずれかに記載の遠赤外発光素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】 40

【0001】

本発明は、遠赤外の発光が可能な発光素子に関する。

【背景技術】

【0002】

赤外領域の半導体発光素子としては、発光波長が 940 nm の GaAs 発光ダイオードや、発光波長が 780 nm の AlGaAs / GaAs ダブルヘテロ接合半導体レーザーが一般的に広く利用されている。近年、光記憶媒体の記録密度の向上や、レーザー加工の微細化を目的として、より発光波長の短い発光ダイオードや半導体レーザーの開発が盛んに行われている。

【0003】 50

一方、より長波長領域にあたる遠赤外光の発光は、既存の化合物半導体素子、例えば、GaAsやAlGaAs半導体のバンドギャップエネルギーよりも小さなバンドギャップエネルギーを必要とするため、化合物半導体を用いた遠赤外発光素子での実現は技術的に困難である。

【0004】

さらに、従来の化合物半導体を用いた発光素子は通常、発光波長の変化が困難であり、固定された波長でしか利用できない。

【0005】

また現在、遠赤外発光を可能にするレーザーとして炭酸ガスレーザが実用化されているが、将来の高速通信技術の分野や、生体分子分光などの基礎研究の分野で必要とされる、より小型で低消費電力の半導体レーザーに関しては、ほとんど動作原理の提案すらされていない。

10

【非特許文献1】Physical Review B, Vol. 40, p. 12566(1989)

【非特許文献2】Physica B, Vol. 184, p.7(1993)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

このように、遠赤外光の発光は、従来型の化合物半導体による発光メカニズムでは実現が困難であり、炭酸ガスレーザ等の大型装置を利用せざるを得なかった。また、従来の化合物半導体を用いた発光素子は波長を変化させることができなかった。

20

上記課題に鑑み、本発明は、遠赤外発光が可能で、且つ波長可変機能を有した、小型、低消費電力の遠赤外発光素子を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記目的を達成するために本発明の第1の遠赤外発光素子は、固体材料中に作製した静磁場中二次元キャリア系と、二次元キャリア系に形成したチャンネルと、チャンネルを横断して設けた第1のゲート電極と、チャンネルに電流を供給するソース及びドレイン電極とを有し、二次元キャリア系を量子ホール状態に設定すると共に第1のゲート電極に電圧を印加して、エッジチャンネル間に非平衡キャリア分布を形成し、且つエッジチャンネル間の化学ポテンシャル差が、ランダウ準位間のエネルギー差以上になる電位差を、ソース及びドレイン電極間に印加することにより、エッジチャンネル間にキャリアの反転分布を形成し、反転分布により遠赤外発光することを特徴とする。

30

【0008】

この構成によれば、キャリアが電子系である場合に以下のように動作する。

二次元キャリア系の量子ホール状態とは、散乱ポテンシャルによって有限の幅を持つランダウ準位間のランダウ準位の存在しない位置にフェルミレベルが存在し、フェルミレベルより下のランダウ準位が全て占有されている状態である。この状態は、印加磁場強度やキャリア濃度を調整して設定する。この状態でソースとドレイン間に電圧を印加すると電流チャンネルとしてエッジチャンネルが生起する。

【0009】

40

第1のゲート電極に負の適切な電圧を印加して、第1のゲート電極下の静電ポテンシャルを増加させ、フェルミレベルが上位エッジチャンネルと下位エッジチャンネルの間にくるようにする。この状態では、上位エッジチャンネルがフェルミレベルよりも高いために、上位エッジチャンネルは第1のゲート電極下を通過できずに反射される。一方、下位エッジチャンネルは第1のゲート電極下を通過する。これにより、チャンネル端を互いに同一方向に進行するソースの化学ポテンシャルを有する上位エッジチャンネルとドレインの化学ポテンシャルを有する下位エッジチャンネルが形成される。上位エッジチャンネルは上位ランダウ準位からなり、下位エッジチャンネルは下位ランダウ準位からなる。このようにエッジチャンネルの化学ポテンシャルが互いに異なる状態をエッジチャンネル間の非平衡キャリア分布状態と呼ぶ(上記非特許文献1参照)。

50

【 0 0 1 0 】

非平衡キャリア分布状態において、ソースとドレイン間の電位差を増加させていくと、低ポテンシャル側のチャンネル端において、エッジチャンネルの化学ポテンシャルが下降し、有限の幅を持つ下位バルク・ランダウ準位のエネルギーレベル領域まで落ち込む。これにより、低ポテンシャル側のチャンネル端近傍の下位ランダウ準位に電子の空席が生じる。このようにして、化学ポテンシャルの高い上位ランダウ準位と、化学ポテンシャルが低く、電子の空席を持つ下位ランダウ準位間に電子の反転分布が形成される。この反転分布によって遠赤外光が生成する。

【 0 0 1 1 】

本発明は、好ましくは、チャンネルのチャンネル端に沿って設けた第2のゲート電極を有し、発光効率が高められる。

10

この構成によれば、第2のゲート電極に適切な負の電圧を印加することにより、フェルミレベルを上位エッジチャンネルと下位エッジチャンネルの間に存在させることができる。この状態では、上位エッジチャンネルがフェルミレベルよりも高いために、上位エッジチャンネルは第2のゲート電極下を通過できず、第2のゲート電極近傍を通過するようになり、下位エッジチャンネルは第2のゲート電極下を通過する。これにより、上位エッジチャンネルと下位エッジチャンネルが空間的に分離される。上位エッジチャンネルと下位エッジチャンネルが空間的に分離されるので、上位エッジチャンネルと下位エッジチャンネル間のフォノン放出を伴う電子遷移が抑制され、遠赤外光の発光効率が高まる。

【 0 0 1 2 】

20

好ましくは、チャンネルはコルビノ型チャンネルであり、発光効率が高められる。この構成によれば、コルビノ型チャンネルは、ホール抵抗が零であるので、遠赤外光の発光に無関係なホール抵抗による発熱を無くすことができ、発光効率が向上する。また、コルビノ型チャンネルは、ソースからドレインに流れる電流方向が、エッジチャンネルと交錯する方向であるため、反転分布形成において、上位ランダウ準位に過剰電子を効率よく供給することができ、発光効率が向上する。

好ましくは、第2のゲート電極を有し、且つチャンネルはコルビノ型チャンネルである。この構成によれば第2のゲート電極による遷移抑制効果とコルビノ型チャンネルによる発光効率向上効果が同時に実現され、さらに発光効率が高まる。

【 0 0 1 3 】

30

また、好ましくは、チャンネルは、棒状のチャンネルを多数回折り返したジグザグ型チャンネルであり、且つこのジグザグ型チャンネルの両端が接続されており、単位面積あたりの発光強度が高められる。この構成によれば、コルビノ型チャンネルと同様にホール抵抗が零であり発光効率が高いと共に、単位面積あたりのチャンネル数が増加するので単位面積あたりの発光強度が増大する。

また、好ましくは、棒状のチャンネルを多数回折り返したジグザグ型チャンネル有し、且つ第2のゲート電極を有する。この構成によれば、上記効果に加えて第2のゲート電極による遷移抑制効果が実現される。

【 0 0 1 4 】

40

本発明の第2の遠赤外発光素子は、固体材料中に作製した静磁場中二次元キャリア系と、二次元キャリア系に形成したチャンネルと、チャンネルのチャンネル端に沿って設けたゲート電極と、チャンネルに電流を供給するソース及びドレイン電極とを有し、二次元キャリア系を量子ホール遷移状態に設定すると共に、エッジチャンネルとバルクチャンネル間の化学ポテンシャル差がランダウ準位間のエネルギー差以上になる電位差をソース及びドレイン電極間に印加してキャリアの反転分布を形成し、且つゲート電極に電圧を印加して、発光効率を高めることを特徴とする。

【 0 0 1 5 】

この構成によればキャリアが電子系の場合に以下のように動作する。

二次元キャリア系の量子ホール遷移状態とは、散乱ポテンシャルによって有限の幅を持つランダウ準位中にフェルミレベルが存在し、フェルミレベルが存在するランダウ準位よ

50

り下のランダウ準位が全て占有され、フェルミレベルの存在するランダウ準位は、フェルミレベル以上の準位が空席である状態である。この状態は、印加磁場強度やキャリア濃度を調整して設定する。この状態でソースとドレイン間に電圧を印加すると電流チャンネルとしてエッジチャンネルとバルクチャンネルが生起する。

【0016】

フェルミレベルが存在するランダウ準位からなるチャンネルはエネルギー散逸を伴う電流チャンネルであり、フェルミレベルより下のランダウ準位はエネルギー散逸を伴わない、いわば超伝導電流チャンネルである。バルクチャンネルはフェルミレベルが存在する上位ランダウ準位からなり、エッジチャンネルはフェルミレベルより下の下位ランダウ準位からなる。ソースとドレイン間に電圧を印加することにより、エッジチャンネルとバルクチャンネル間に非平衡キャリア分布が生じる。ソースとドレイン間の印加電圧を増大していくと、低ポテンシャル側のチャンネル端でエッジチャンネルの化学ポテンシャルが、有限の幅を持つ下位バルク・ランダウ準位のエネルギーレベル領域にまで降下する。これにより、チャンネル端近傍の下位ランダウ準位に電子の空席が生じる。このようにして、化学ポテンシャルの高い上位ランダウ準位と、化学ポテンシャルが低く、電子の空席を有する下位ランダウ準位間に反転分布が形成される（上記非特許文献2参照）。この反転分布によって遠赤外光が生成される。

10

【0017】

この際、チャンネル端に沿って設けた第2のゲート電極に適切な負の電圧を印加することにより、フェルミレベルが上位ランダウ準位と下位ランダウ準位の間にくるようにする。この状態では、上位ランダウ準位のバルクチャンネルは、フェルミレベルよりも高いために、ゲート電極下を通過できずゲート電極近傍を通過するようになり、下位ランダウ準位のエッジチャンネルは電極下を通過する。これにより、上位ランダウ準位のバルクチャンネルと下位ランダウ準位のエッジチャンネルが空間的に分離されるためバルクチャンネルとエッジチャンネル間のフォノンを介した電子遷移が抑制され、遠赤外光の発光効率が高まる。

20

【0018】

上記構成において、好ましくは、チャンネルはコルビノ型チャンネルであり、発光効率が高められる。この構成によれば、コルビノ型チャンネルはホール抵抗が零であるので、遠赤外光の発光に無関係なホール抵抗による発熱を無くすることができ、発光効率が向上する。また、コルビノ型チャンネルは、ソースからドレインに流れる電流方向が、エッジチャンネルと交錯する方向であり、反転分布形成において上位ランダウ準位へ過剰電子を効率よく供給することができ、発光効率が向上する。

30

好ましくは、チャンネルは、棒状のチャンネルを多数回折り返したジグザグ型チャンネルであり、且つジグザグ型チャンネルの両端が接続されており、単位面積あたりの発光強度が高められる。この構成によれば、単位面積あたりのチャンネル数が増加するので実効的に単位面積あたりの発光強度が増大する。

【0019】

本発明の第3の遠赤外発光素子は、固体材料中に作製した静磁場中二次元キャリア系と、二次元キャリア系に形成したチャンネルと、チャンネルを横断して設けた第1のゲート電極と、チャンネルに電流を供給するソース及びドレイン電極とを有し、二次元キャリア系を量子ホール遷移状態に設定すると共に第1のゲート電極に電圧を印加し、且つ電流チャンネル間の化学ポテンシャル差が、ランダウ準位間のエネルギー差以上になる電位差を、ソース及びドレイン電極間に印加することにより、電流チャンネル間にキャリアの反転分布を形成し、反転分布により遠赤外発光することを特徴とする。

40

【0020】

この構成によればキャリアが電子系の場合に以下のように動作する。

印加磁場強度やキャリア濃度を調整して本発明の第2の遠赤外発光素子と同様に、二次元電子系を量子ホール遷移状態に設定する。第1のゲート電極に負の適切な電圧を印加して、第1のゲート電極下の静電ポテンシャルを増加させ、フェルミレベルが上位ランダウ準位と下位ランダウ準位の間にくるようにする。この状態では、バルクチャンネルは上位ラ

50

ランダウ準位からなり、エッジチャンネルは下位ランダウ準位からなる。上位ランダウ準位がフェルミレベルよりも高いために、バルクチャンネルは第1のゲート電極下を通過できずに反射され、ドレイン電極まで到達できない。いわば、第1のゲートによるポテンシャル障壁は、バルクチャンネルの電流がドレイン電極に流れるのをせき止めるダム役割をする。これにより、バルクチャンネルの化学ポテンシャルを第1のゲートが無い場合よりも高く維持することができ、効率的に反転分布を形成することができ、発光効率が向上する。

【0021】

ソースとドレイン間の印加電圧を増大していくと、低ポテンシャル側のチャンネル端でエッジチャンネルの化学ポテンシャルがバルクの下位ランダウ準位のエネルギーレベル領域まで下降し、下位ランダウ準位に電子の空席が生じる。これにより、化学ポテンシャルが高いバルク上位ランダウ準位と化学ポテンシャルが低く、電子の空席を有する下位ランダウ準位の間に電子の反転分布が形成される。この反転分布によって遠赤外光が生成される。

10

【0022】

上記構成において、好ましくは、チャンネル端に沿って設けた第2のゲート電極を有し、発光効率が高められる。この構成によれば、チャンネル端に沿って設けた第2のゲート電極に適切な負の電圧を印加することにより、フェルミレベルが上位ランダウ準と下位ランダウ準位の間にくるようにすることができる。この状態では、バルクチャンネルは上位ランダウ準位からなり、エッジチャンネルは下位ランダウ準位からなる。上位ランダウ準位はフェルミレベルよりも高いために、バルクチャンネルはゲート電極下を通過できず、ゲート電極近傍を通過するようになり、一方、下位ランダウ準位は、フェルミレベルよりも低いために、ゲート電極下を通過し、エッジチャンネルとバルクチャンネルが空間的に分離される。第2のゲート電極による空間分離と第1のゲート電極による高化学ポテンシャルの維持が同時に実現され、さらに遠赤外光の発光効率が高まる。

20

【0023】

上記構成において、好ましくは、チャンネルはコルビノ型チャンネルであり、発光効率が高められる。この構成によれば、コルビノ型チャンネルは、ホール抵抗が零であるので、遠赤外光の発光に無関係なホール抵抗による発熱を無くすることができ、発光効率が向上する。また、コルビノ型チャンネルは、ソースからドレインに流れる電流方向が、電流チャンネルと交錯する方向であり、反転分布形成において上位ランダウ準位へ過剰電子を効率よく供給

30

することができ、発光効率が向上する。
さらに好ましくは、第2のゲート電極を有し、且つチャンネルはコルビノ型チャンネルである。この構成によれば第2のゲート電極による遷移抑制効果とコルビノ型チャンネルによる発光効率向上効果が同時に実現し、さらに発光効率が高まる。

また好ましくは、チャンネルは、棒状のチャンネルを多数回折り返したジグザグ型チャンネルであり、且つチャンネルの両端が接続されており、ホール抵抗による発熱がないと共に単位面積あたりの発光強度が高められる。この構成によれば単位面積あたりのチャンネル数が増加するので実効的に単位面積あたりの発光強度が増大する。

上記構成にあって、第2のゲート電極を有し、且つチャンネルが棒状のチャンネルを多数回折り返したジグザグ型チャンネルであることが好ましい。この構成によれば、第2のゲート電極による遷移抑制効果による発光効率の向上と、ホール抵抗による発熱がないと共に単位面積の発光強度増大が同時に実現される。

40

【0024】

また、好ましくは、上記第1、第2及び第3の遠赤外発光素子は、固体材料中に作製した静磁場中二次元キャリア系に印加する磁場の強度を調整することにより、発光波長を調整する。

この構成によれば、印加磁場強度によりランダウ準位間隔を変えることができるので、発光波長を変化させることができる。また、キャリア濃度を調整すれば占有されるランダウ準位数を変化させることができるので、フェルミレベルの存在位置を変化させることができ、任意のランダウ準位占有率の量子ホール状態、及び量子ホール遷移状態を実現でき

50

る。

【発明の効果】

【0027】

本発明によれば、固体材料の静磁場中二次元電子系と、ランダウ準位間の反転分布を形成する手段とによって、これまで、低コスト、利便性に優れた良い光源が無かった遠赤外領域において、波長可変で小型、すなわち、低コスト、利便性に優れた遠赤外発光素子が可能になる。さらに、コルビノ型に構成し、チャンネル端近傍にゲート電極を付加することにより、効率のよい遠赤外発光素子が可能になる。さらに、光フィードバック機構を付加することにより、レーザー発振も可能になる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0028】

以下、本発明の実施の形態を図面を参照して詳細に説明する。なお、実質的に同一の構成要素には説明を簡潔にするため同一の符号を付して説明する。また、二次元キャリア系が電子系の場合について説明し、ホール系は実質的に同一なので説明を省略する。

初めに本発明の第1の実施の形態の遠赤外発光素子を説明する。

図1は、本発明の第1の実施の形態の遠赤外発光素子の構成を示す図であり、(a)は平面図、(b)はZ-Z断面図である。なお、図1は第1の実施の形態に属する複数の構成のうち、第2のゲート電極を有し、且つチャンネル形状がコルビノ型の構成の場合を示している。

【0029】

本発明の遠赤外発光素子1aは、GaAs2とGaAlAs3の界面に形成した二次元電子系4上に、円盤形状のソース電極5、ソース電極5の外側に円環状を成し且つ円環の一部に切欠部分6aを有する第2のゲート電極6、この第2のゲート電極6の切欠部分6aから金属ゲート6の外側に一定距離離れた位置に第1のゲート電極7、第1のゲート電極7のさらに外側にドレイン電極8を有している。また、GaAs基板2の裏面側に裏面ゲート電極9を有していてもよい。

二次元電子系4はこの構成に限らず、他の化合物半導体を使用してもよく、またSi表面の反転層を利用してもよい。また、円盤状のソース電極5と、ソース電極5を囲んで円環状の第2のゲート電極6を配置した形状はコルビノ型量子ホール素子と呼ばれ、従来から知られている。

図の点線10a, 10bは、上位及び下位エッジチャンネルを表しており、上位エッジチャンネル10aは上位ランダウ準位10aであり、下位エッジチャンネル10bは下位ランダウ準位10bである。

【0030】

次に、本発明の遠赤外発光素子の動作を説明する。

図1の遠赤外発光素子1aに、図面垂直方向に静磁場を印加し、二次元電子系をランダウ準位充填率4の量子ホール状態にする。第1のゲート電極7に負の電圧を印加して第1のゲート電極7の下のランダウ準位充填率を2に設定すると、第1のゲート電極7の下には印加電圧による静電ポテンシャルの増加により、下位エッジチャンネル10bのみが通過し、上位エッジチャンネル10aは、第1のゲート電極7の下を通過できず、第1のゲート電極7の周辺に沿って走る。

これにより、ソースの化学ポテンシャル μ_s に近く、ドレインの化学ポテンシャル μ_D よりも大きな化学ポテンシャルを有する上位エッジチャンネル10aと、ドレインの化学ポテンシャル μ_D を有する下位エッジチャンネル10bが形成され、チャンネル端を互いに同一方向に進行し、非平衡キャリア分布状態が形成される。

【0031】

さらに、ソース電極5とドレイン電極8との間の電位差を調整して、上位エッジチャンネル10aと下位エッジチャンネル10bの化学ポテンシャル差 μ_{ab} が、ランダウ準位エネルギー差、即ちサイクロトロンエネルギー($=\hbar\omega_c/2$, \hbar :プランク定数, ω_c :サイクロトロン周波数)以上の化学ポテンシャル差になるようにすると、上位エッジチャ

10

20

30

40

50

ネル 10 a と下位エッジチャンネル 10 b 間に反転分布が形成される。この反転分布によって遠赤外発光が可能になる。

なお、二次元電子系をランダウ準位充填率 4 の量子ホール状態にするには、図 1 (b) に示すように、GaAs 発光ダイオード 11 の光照射を併用してもよい。この場合には光照射によるキャリア濃度の増加によって、ランダウ準位の充填率を調整できる。また、裏面ゲート電極 9 に電圧を印加して調整してもよい。

【0032】

図 2 は、エッジチャンネル間の反転分布の形成を説明する図である。(a) はソース電極 5 の中心を原点とした半径 r 方向のランダウ準位のエネルギー構造を示しており、横軸は半径 r 、縦軸はエネルギー E を示している。(b) は電子に関して低ポテンシャル側のチャンネル端、すなわち図 1 における第 2 のゲート電極 6 近傍の上位及び下位ランダウ準位 10 a, 10 b の反転分布を示しており、横軸はランダウ準位の状態密度 $D(E)$ 、縦軸はランダウ準位のエネルギー E を示す。

10

【0033】

通常、ランダウ準位は乱雑ポテンシャルの影響で有限の幅 d を有している。ソース電極 5 とドレイン電極 8 の電位差を増大していき、上位エッジチャンネル 10 a と下位エッジチャンネル 10 b 間の化学ポテンシャルの差 μ_{ab} がサイクロトロンエネルギーを越えると、(a) に示すように低ポテンシャル側のチャンネル端において、下位エッジチャンネル 10 b の化学ポテンシャル μ_b がバルクのランダウ準位の化学ポテンシャル μ_B にまで落ち込み、下位ランダウ準位 10 b に電子の非占有部分 A が生じる。電子の非占有部分 A が生じると、電荷中性を保つために上位ランダウ準位 10 a に電子 e^- が集積し、過剰電子集積部分 B が生じる。このようにして、低ポテンシャル側のエッジチャンネル間に反転分布を形成することができる。(b) に示すように、過剰電子集積部分 B から電子非占有部分 A に電子が光子を放出して遷移することによって、遠赤外光 21 が生成できる。

20

【0034】

次に、第 2 のゲート電極 6 に負の電圧を印加した効果について説明する。

図 1 において、第 2 のゲート電極 6 に負の電圧を印加することにより、第 2 のゲート電極 6 の下のランダウ準位充填率を 2 に調整する。このとき、第 2 のゲート電極 6 の下には下位ランダウ準位のエッジチャンネル 10 b のみが通過し、上位ランダウ準位のエッジチャンネル 10 a は、印加電圧によるポテンシャル障壁により、第 2 のゲート電極 6 の下を通過できず、第 2 のゲート電極 6 の周辺に沿って走る。これにより、エッジチャンネル 10 a, 10 b が第 2 のゲート電極 6 の全周にわたって空間的に分離され、エッジチャンネル 10 a, 10 b 間の、すなわち、ランダウ準位 10 a, 10 b 間のフォノン放出による電子遷移が抑制され、第 2 のゲート電極 6 の全周にわたって発光効率を高めることができる。

30

【0035】

次に、チャンネル形状がコルビノ型形状である場合の効果を説明する。

一般に、コルビノ型形状のチャンネルにおいては、ソースとドレイン間に印加する電場の方向がソース電極の半径方向であり、この電場とチャンネルに垂直に印加する磁場によるローレンツ力はソース電極を中心とした円周方向となり、この円周方向には端点がないためにホール抵抗が零となる。図 1 に示した本発明の遠赤外発光素子においては、第 1 のゲート電極 7 によって上位エッジチャンネル 10 a を反射して周回させるので、上記一般のコルビノ型チャンネルの場合と同様に端点無く、ホール抵抗が生じない。また、下位エッジチャンネル 10 b もソース電極 8 から出てソース電極 8 に戻るためホール抵抗が生じない。さらに、コルビノ型チャンネルは、ソース 5 からドレイン 8 に流れる電流方向が、エッジチャンネル 10 a, 10 b と交錯する方向であるため、反転分布形成において、上位ランダウ準位 10 a に過剰電子 e^- を効率よく供給することができ、発光効率が向上する。

40

本発明の遠赤外発光メカニズムにおいては、ホール抵抗は何ら発光に関与しないので、ホール抵抗が零であれば、発光効率が向上する。また、過剰電子の供給効率が高いので発光効率が低い。

【0036】

50

次に、本発明の第 1 の実施の形態の遠赤外発光素子に属する他の構成の遠赤外発光素子を説明する。

図 3 は、本発明の第 1 の実施の形態の遠赤外発光素子に属する他の構成の遠赤外発光素子を説明する図であり、(a) は平面図、(b) 及び(c) は断面図である。この遠赤外発光素子 1 b は、図 1 に示した構成と比べて、第 1 のゲート電極として 2 つの第 1 のゲート電極 7 a , 7 b を有する点が異なり、2 次元電子系は(b) 及び(c) に示されているように、第 2 のゲート電極 6 の下に形成されたリング状の 2 次元電子系 4 a と、ソース電極 5 の下から伸びて 2 次元電子系 4 a と接続され、ドレイン電極 8 の下に至る 2 次元電子系 4 b とからなる点が異なり、また、第 2 のゲート電極 6 は第 1 のゲート電極 7 b を配設するための第 2 の切欠き部分 6 b を有することが異なる。

10

【 0 0 3 7 】

この構成によれば、ソース 5 の化学ポテンシャル μ_s を有してソース電極 5 を出た上位エッジチャンネル 1 0 a は、2 次元電子系 4 b のチャンネル端(2 次元電子系 4 b の端) に沿って走り、次に 2 次元電子系 4 a の内側のチャンネル端(2 次元電子系 4 a の内側の端) に沿って走り、次に第 1 のゲート電極 7 b で反射されて第 1 のゲート電極 7 b の縁に沿って走り、次に 2 次元電子系 4 a の外側のチャンネル端に沿って走り、次に第 1 のゲート電極 7 a で反射されて第 1 のゲート電極 7 a の縁に沿って走り、次に 2 次元電子系 4 a の外側のチャンネル端に沿って走り、次に第 1 のゲート電極 7 b で反射されて第 1 のゲート電極 7 b の縁に沿って走り、次に 2 次元電子系 4 a の内側のチャンネル端に沿って走り、そして 2 次元電子系 4 b のチャンネル端に沿って走り、ソース電極 5 に戻る。

20

【 0 0 3 8 】

一方、ドレイン 8 の化学ポテンシャル μ_D を有してドレイン電極 8 を出た下位エッジチャンネル 1 0 b は、2 次元電子系 4 b のチャンネル端に沿って走り第 1 のゲート電極 7 a の下を通過し、次に 2 次元電子系 4 a の外側のチャンネル端に沿って走り、次に第 1 のゲート電極 7 b の下を通過して 2 次元電子系 4 a の外側のチャンネル端に沿って走り、そして 2 次元電子系 4 b のチャンネル端に沿って走り第 1 のゲート電極 7 a の下を通過しドレイン電極 8 に戻る。

【 0 0 3 9 】

従って、2 次元電子系 4 a の外側のチャンネル端では、ソース 5 の化学ポテンシャル μ_s を有した上位エッジチャンネル 1 0 a とドレイン 8 の化学ポテンシャル μ_D を有した下位エッジチャンネル 1 0 b とが同一方向に走る。ソースとドレインの印加電圧を増加させることによって上位エッジチャンネル 1 0 a と下位エッジチャンネル 1 0 b との間に反転分布を形成することは、図 1 及び図 2 の説明と同様であるが、遠赤外発光素子 1 b の場合には、上位エッジチャンネル 1 0 a の化学ポテンシャルを強制的にソース 5 の化学ポテンシャル μ_s に等しくできるので、発光効率が高い。なお、第 2 のゲート電極及びコルビノ型チャンネルの効果は図 1 の説明と同様であるので省略する。

30

【 0 0 4 0 】

次に、本発明の第 1 の実施の形態の遠赤外発光素子に属する他の構成の遠赤外発光素子を説明する。

図 4 は、本発明の第 1 の実施の形態の遠赤外発光素子に属する他の構成の遠赤外発光素子を説明する図であり、(a) は平面図、(b) は断面図である。この遠赤外発光素子 1 c は、図 3 に示した構成と比べて、第 1 のゲート電極と第 2 のゲート電極とを一体化した、ゲート電極 6 を設けた点が異なる。ゲート電極 6 は、図 3 の第 1 のゲート電極 7 b に相当してチャンネルの内側に向かう突出部 6 c を有している。

40

この構成によれば、図 3 における第 1 のゲート電極 7 a の作用はゲート電極 6 のドレイン近傍の部分によって代替され、また、第 1 のゲート電極 7 b の作用は突起部 6 c によって代替される。

【 0 0 4 1 】

次に、本発明の第 1 の実施の形態の遠赤外発光素子に属する、チャンネルがジグザグ形状である場合の遠赤外発光素子を説明する。

50

図5は、本発明のチャンネルがジグザグ形状である場合の遠赤外発光素子の構成を示す図である。遠赤外発光素子1dは、図1の構成と比べて、チャンネル32を両端が接続されたジグザグ形状とし、第2のゲート電極33をチャンネル32の端を覆ってジグザグ形状に設けた点異なる。

図1の遠赤外発光素子の場合と同様に、図面垂直方向に静磁場を印加し、二次元電子系をランダウ準位充填率4の量子ホール状態に設定し、第1のゲート電極37に負の電圧を印加して第1のゲート電極37の下のランダウ準位充填率を2に設定し、ソース電極35とドレイン電極38間にサイクロトロンエネルギー以上の電位差を印加し、ゲート電極33に負の電圧を印加してランダウ準位充填率を2に設定する。

これにより、図2の説明と同様に、エッジチャンネル間に反転分布が形成され、遠赤外光が発生する。また、チャンネル32の両端が接続され、第1のゲート電極37を有することから、コルビノ型チャンネルと同様にホール抵抗が無く、またエッジチャンネルが第2のゲート電極33によって空間的に分離されているので発光効率が高いことは図1に示した構成の遠赤外発光素子1と同様であるが、遠赤外発光素子1dはさらに、チャンネルがジグザグに折り返されているために、実効的に単位面積あたりの発光領域が増大し、発光強度を高めることができる。なお、図においては、第1のゲート電極37がある場合を示しているが、第2のゲート電極33のドレイン電極と対向する部分33aが同様な効果を生ずるので、この第1のゲート電極37は無くともよい。ただし、第1のゲート電極37と第2のゲート電極33に印加する電圧を変化させて発光強度を変調する場合には第1のゲート電極37は必要である。

【0042】

なお、上記した第1の実施の形態の遠赤外発光素子以外の第1の実施の形態に属する他の構成の遠赤外発光素子は、上記説明から容易に理解できるので説明を省略する。

【0043】

次に、本発明の第2の実施の形態の遠赤外発光素子を説明する。

図6は本発明の第2の実施の形態の遠赤外発光素子の構成を示す上面図である。図6は、第2の実施の形態に属する複数の構成のうち、第2のゲート電極を有し且つチャンネル形状がコルビノ型の構成の場合を示している。

遠赤外発光素子2aは、図1の遠赤外発光素子1の構成と比べて、図1の第1のゲート電極7が無いことのみ異なる。また、動作させるための設定は図1の遠赤外発光素子1aの場合と比べて、二次元電子系を量子ホール遷移状態に設定することのみ異なる。

二次元キャリア系の量子ホール遷移状態とは、散乱ポテンシャルによって有限の幅を持つランダウ準位中にフェルミレベルが存在し、フェルミレベルの存在するランダウ準位より下のランダウ準位は全て占有され、フェルミレベルの存在するランダウ準位は、フェルミレベル以上の準位が空席の状態である。この状態は、印加磁場強度やキャリア濃度を調整して設定する。この状態でソースとドレインに電圧を印加すると電流チャンネルとしてバルクチャンネルとエッジチャンネルが生起される。

【0044】

フェルミレベルが存在するランダウ準位からなるチャンネルはエネルギー散逸を伴う電流チャンネルであり、フェルミレベルより下のランダウ準位はエネルギー散逸を伴わない、いわば超伝導電流チャンネルである。バルクチャンネル42aはフェルミレベルが存在する上位ランダウ準位からなり、エッジチャンネル42bはフェルミレベルより下の下位ランダウ準位からなる。ソース5とドレイン8間に電圧を印加することにより、エッジチャンネル42bとバルクチャンネル42a間に非平衡キャリア分布が生じる。ソース5とドレイン8間の印加電圧を増大し、エッジチャンネル42bとバルクチャンネル42a間の化学ポテンシャル差をサイクロトロンエネルギー以上にすると、下位エッジチャンネル42bの化学ポテンシャルが有限の幅を持つ下位バルク・ランダウ準位のエネルギーレベルにまで降下する。これにより、チャンネル端近傍の下位ランダウ準位42bに電子の空席が生じる。このようにして、化学ポテンシャルの高い上位ランダウ準位42aと、化学ポテンシャルが低く電子の空席を有する下位ランダウ準位42b間に反転分布が形成される。この反転分布によ

て遠赤外光が生成される。

【0045】

この際、チャンネル端に沿って設けた第2のゲート電極6に適切な負の電圧を印加することにより、フェルミレベルが上位ランダウ準位42aと下位ランダウ準位42bの間にくるようにする。この状態では、バルクチャンネル42aは、フェルミレベルよりも高いために、ゲート電極6下を通過できず、ゲート電極6近傍を通過するようになり、エッジチャンネル42bはゲート電極6近傍を通過する。これにより、エッジチャンネル42bとバルクチャンネル42aが空間的に分離されるため、バルクチャンネル42aとエッジチャンネル42b間のフォノン放出を伴う電子遷移が抑制され、遠赤外光の発光効率が高まる。

なお、コルピノ型チャンネルの効果は、図1の構成で説明した効果と同様にホール抵抗が無いこと及び過剰電子供給効率が高いことであるので説明を省略する。

10

【0046】

また、棒状のチャンネルを多数回折り返したジグザグ型チャンネルを用いた構成は、図3に説明した構成において第1のゲート電極37が無いことのみ異なり、単位面積あたりの発光強度が増大する効果は同様であるので説明を省略する。また、上記した本発明の第2の実施形態の遠赤外発光素子以外の本発明の第2の実施形態の遠赤外発光素子に属する他の構成は、上記説明から容易に理解できるので説明を省略する。

【0047】

次に、本発明の第3の実施の形態の遠赤外発光素子を説明する。

本発明の第3の実施の形態の遠赤外発光素子は、上記した本発明の第1の実施の形態の遠赤外発光素子と構成が同じであり、二次元電子系を量子ホール遷移状態に設定して動作させることのみ異なる。効果は、上記第1及び第2の実施の形態の遠赤外発光素子の説明から理解できるので説明を省略する。

20

【0048】

次に、本発明の第4の実施形態である遠赤外レーザーを説明する。

図7は、本発明の第4の実施形態である遠赤外レーザーの構成を示す図である。この遠赤外レーザー51は、本発明の遠赤外発光素子52を挟んで、反射率が高い凹面鏡53と半透過性の平面鏡54が配置された構成であり、凹面鏡53と半透過性平面鏡54とで構成されたレーザー共振器と、遠赤外発光素子51の反転分布とでレーザー発振する。

【0049】

次に、本発明の第5の実施形態である遠赤外レーザーを説明する。

図8は、本発明の第5の実施形態である遠赤外レーザーの構成を示す図である。本発明の遠赤外レーザー61は、GaAs基板62上にGaAlAsをヘテロ接合して形成した二次元電子系63を有する本発明の遠赤外発光素子61と、遠赤外発光素子61の表面側に密着させた、遠赤外発光素子61の発光する遠赤外光波長の1/4以上の厚さを有するGaAs基板64と、GaAs基板62の裏面側に設けた金属等の反射率の高い反射膜65とからなる。

30

この構成によれば、GaAsの屈折率が3.4程度であるから、GaAs基板64は、遠赤外発光素子61の発光波長に対して反射率30%程度の半透過膜となる。GaAs基板64と反射膜65とでレーザー共振器が構成できる。また、上記のように遠赤外光波長の1/4以上の厚さを有するGaAs基板64を用いる代わりに、表面66から二次元電子系63に到る深さtが発光波長の1/4以上となるように構成してもよい。

40

【0050】

次に、実施例を説明する。この実施例は、本発明の第2の実施形態に属するジグザグチャンネルによる遠赤外発光素子の発光を測定したものである。

二次元電子系はGaAsとGaAlAsのヘテロ接合によるものである。ジグザグチャンネルの一辺の長さ及び幅はそれぞれ3mm、0.5mmである。印加磁場は6T(テスラ)、ランダウ準位間隔は10meVである。測定温度は4.2Kであり、測定装置は量子ホール検出器を用いたTHz顕微鏡である。

【0051】

50

図9は、本発明の遠赤外発光素子が発光している様子を示す図である。(a)の左図は紙面垂直下方向に磁場を印加した場合の発光を示し、右図は、紙面垂直上方向に磁場を印加した場合の発光を示している。(b)はソースとドレイン間に印加する電圧の極性を(a)とは逆にした場合の発光を示し、左図は紙面垂直下方向に、右図は紙面垂直上方向に磁場を印加した場合の発光を示している。

図からわかるように、低ポテンシャル側のチャネル端で発光することがわかる。また、磁場方向、又はソース・ドレイン間の電圧極性を変化させることによって、発光するチャネル端が変化することから、チャネル間の反転分布に基づく発光であることがわかる。

【0052】

図10は、上記発光チャネル端の遠赤外発光素子の発光特性を示す図である。横軸は波長を示し、縦軸は任意メモリで示した発光強度である。図から、中心波長 = 120 μmの赤外光が、半値幅 = 6 μmで放出されていることがわかる。この半値幅はバンド幅に換算すると約5%に相当し極めて鋭い。

【0053】

上記説明では、量子ホール素子としてコルビノ型チャネル素子、ジグザグ型チャネル素子を用いて説明したが、これに限らず、エッジチャネル間、又はエッジチャネルとバルクチャネル間に反転分布を形成できる構成の量子ホール素子であれば使用可能である。また、上に説明した共振器は一例であって、上記共振器に限られるものではない。

【図面の簡単な説明】

【0054】

【図1】第1の実施の形態に係る遠赤外発光素子の構成を示し、(a)は平面図、(b)はZ-Z断面図である。

【図2】エッジチャネルの反転分布の形成を説明する図である。

【図3】第1の実施の形態に係る遠赤外発光素子に属する他の構成の遠赤外発光素子を説明する図であり、(a)は平面図、(b)はY-Y断面図、(c)はZ-Z断面図である。

【図4】第1の実施の形態に係る遠赤外発光素子に属する他の構成の遠赤外発光素子を説明する図であり、(a)は平面図、(b)は断面図である。

【図5】チャネルがジグザグ形状である場合の遠赤外発光素子の構成を示す図である。

【図6】第2の実施の形態に係る遠赤外発光素子の構成を示す平面図である。

【図7】本発明の第4の実施形態である遠赤外レーザーの構成を示す図である。

【図8】本発明の第5の実施形態である遠赤外レーザーの構成を示す図である。

【図9】本発明の遠赤外発光素子が発光している様子を示す図である。

【図10】本発明の遠赤外発光素子の発光特性を示す図である。

【符号の説明】

【0055】

- 1 a 第1の実施の形態による遠赤外発光素子
- 1 b 第1の実施の形態による他の遠赤外発光素子
- 1 c 第1の実施の形態による他の遠赤外発光素子
- 1 d 第1の実施の形態によるジグザグチャネルによる遠赤外発光素子
- 2 a 第2の実施の形態による遠赤外発光素子
- 2 GaAs基板
- 3 GaAlAs
- 4 2次元電子系
- 5 ソース電極
- 6 第2のゲート電極
- 6 a 第2のゲート電極の切欠部分
- 6 b 第2のゲート電極の切欠部分
- 7 第1のゲート電極
- 7 a 第1のゲート電極

10

20

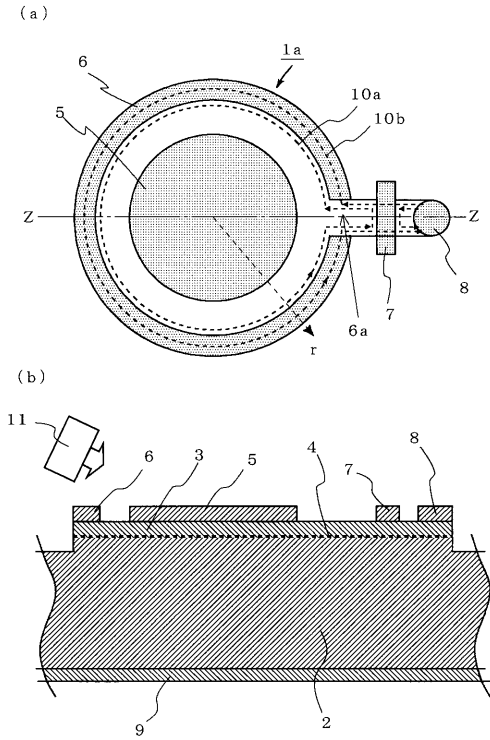
30

40

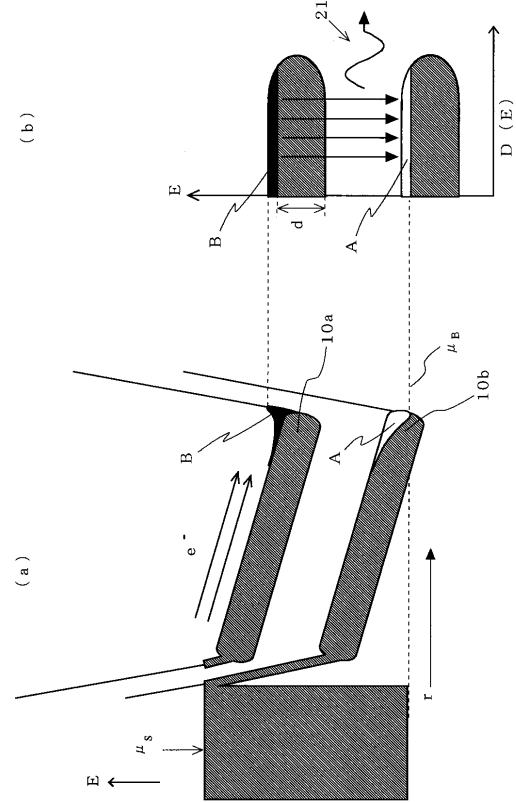
50

- 7 b 第1のゲート電極
- 8 ドレイン電極
- 9 裏面ゲート電極
- 10 a エッジチャンネル、バルクチャンネル、上位ランダウ準位
- 10 b エッジチャンネル、下位ランダウ準位
- 11 光源
- 21 遠赤外発光
- 32 チャンネル
- 33 第2のゲート電極
- 34 発光領域 10
- 35 ソース電極
- 37 第1のゲート電極
- 38 ドレイン電極
- 41 本発明の第2の実施の形態の遠赤外発光素子
- 42 a バルクチャンネル
- 42 b エッジチャンネル
- 51 第4の実施形態である遠赤外レーザー
- 52 遠赤外発光素子
- 53 凹面鏡
- 54 金属メッシュ平面鏡 20
- 61 第5の実施形態による遠赤外レーザー
- 62 GaAs基板
- 63 2次元電子系
- 64 遠赤外光の波長以上の厚さを有するGaAs基板
- 65 反射膜
- 66 表面

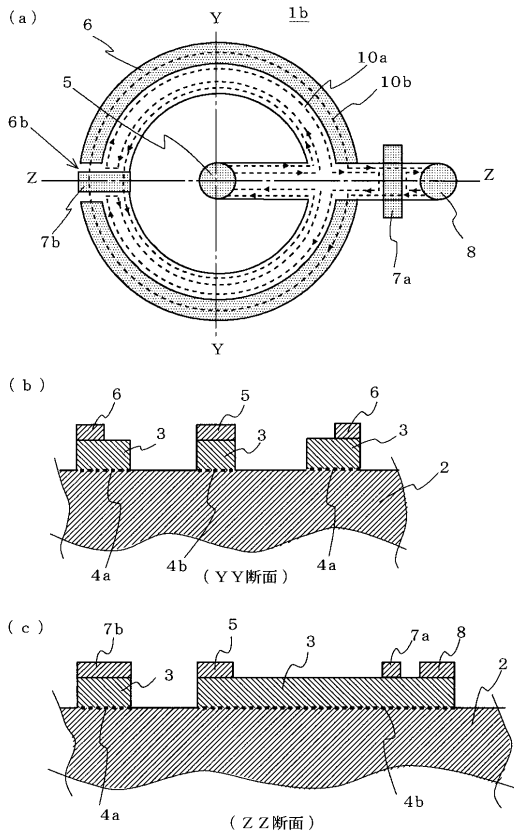
【図1】



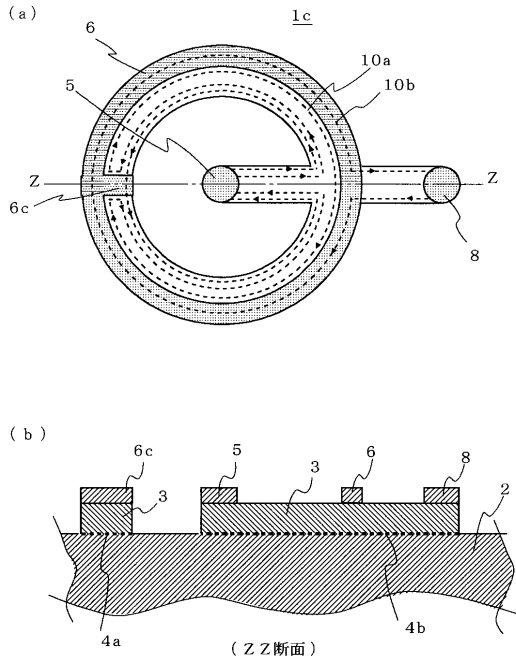
【図2】



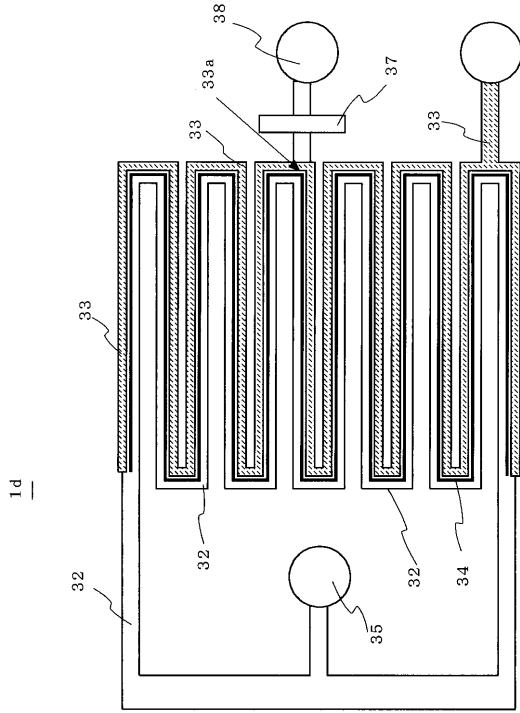
【図3】



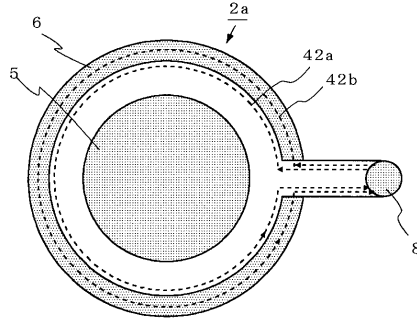
【図4】



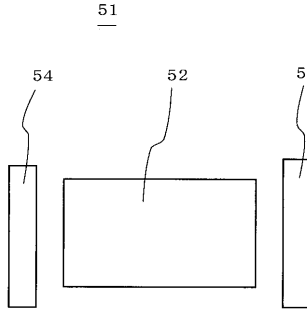
【図5】



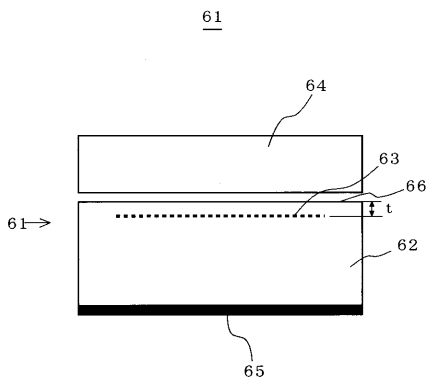
【図6】



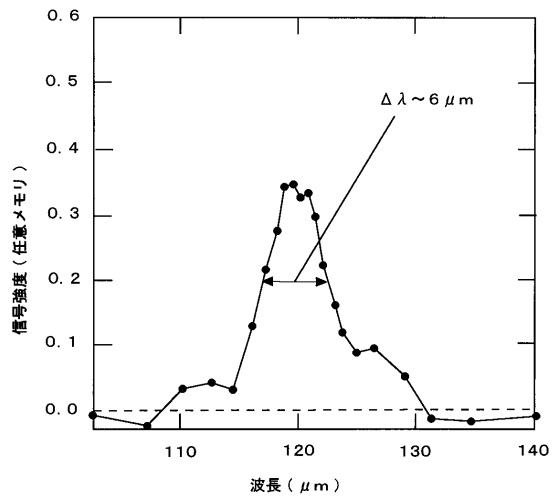
【図7】



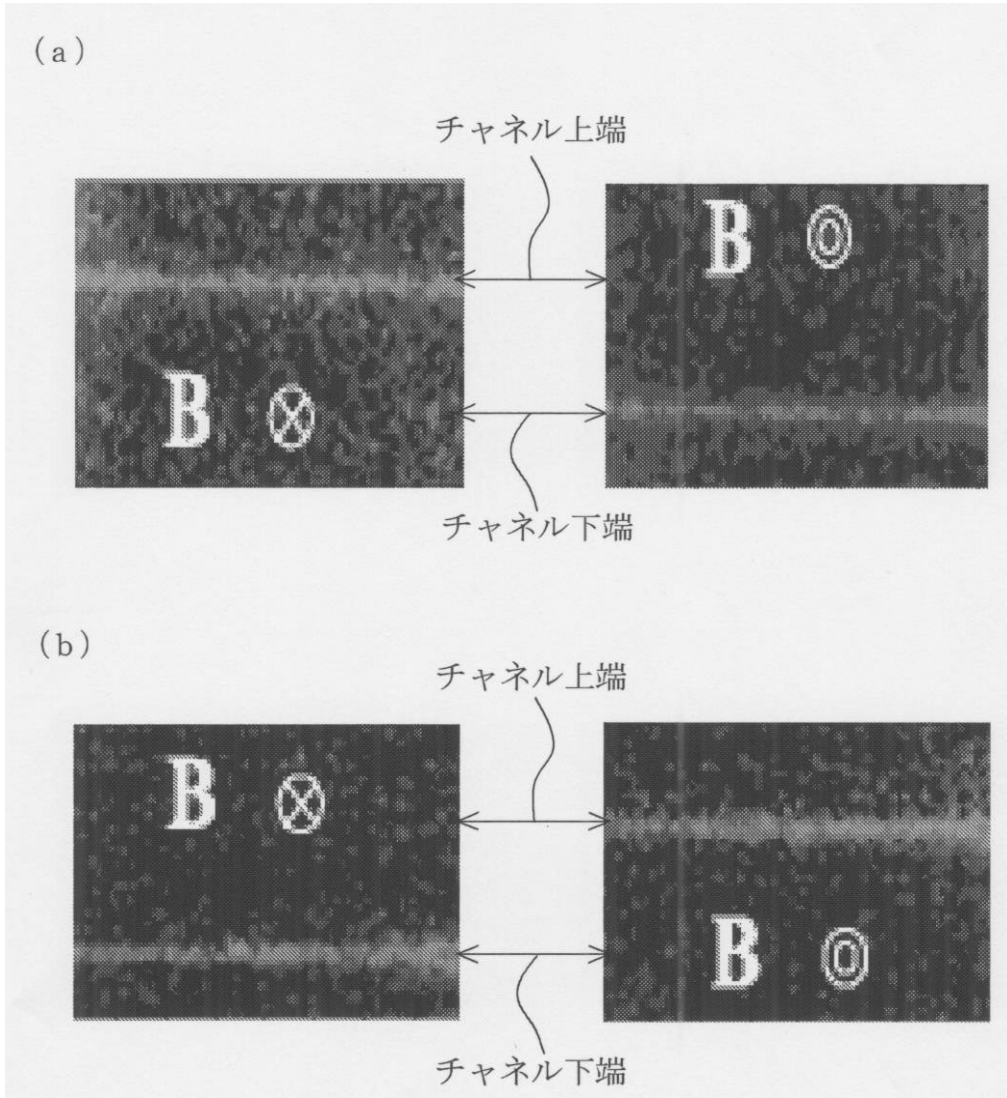
【図8】



【図10】



【図9】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平 1 1 - 0 0 4 0 1 7 (J P , A)
特開 2 0 0 1 - 0 6 8 7 6 3 (J P , A)
特開平 1 1 - 1 2 1 8 3 1 (J P , A)
特開平 0 3 - 1 7 7 0 8 5 (J P , A)
S. Komiyama, et al, Violation of the integral quantum Hall effect: Influence of backscattering and the role of voltage contacts, Physical Review B, 1989年12月15日, vol.40, no.18, pp.12566-12569
S. Komiyama, H.Nii, Nonequilibrium electron distribution and nonlocal resistance in a two-dimensional electron gas at high magnetic fields, Physica B, 1993年, vol.184, pp.7-16
Y. Kawano, et al, Cyclotron emission from quantized Hall devices: Injection of nonequilibrium electrons from contacts, Physical Review B, 1999年 5月15日, vol.59, no.19, pp.12537-12546
A. Wurtz, et al, Separately contacted edge states: A spectroscopic tool for the investigation of the quantum Hall effect, Physical Review B, 2002年, vol.65, p.075303
Y. Kawano, et al, Highly sensitive and tunable detection of far-infrared radiation by quantum Hall devices, Journal of Applied Physics, 2001年 4月 1日, vol.89, no.7, pp.4037-4048
生嶋健司、佐久間寿人、小宮山進、平川一彦、量子ホール素子の THz イメージング I : エッジチャンネルからのサイクロトロン発光, 日本物理学会講演概要集, 2003年 8月15日, vol.58, no.2-4, p.586

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 1 S 1 / 0 0 - 5 / 5 0
S c i e n c e D i r e c t
I E E E X p l o r e
C i N i i
J S T P l u s (J D r e a m I I)