

Si検出器用電荷増幅回路の 製作とシミュレーション

2024.03.11 卒業研究発表会

高エネルギー物理学研究室 B4石垣優衣

目次

1. 研究背景
2. 研究目的
3. シミュレーションの作成
4. 測定方法
5. まとめと今後の課題

研究背景

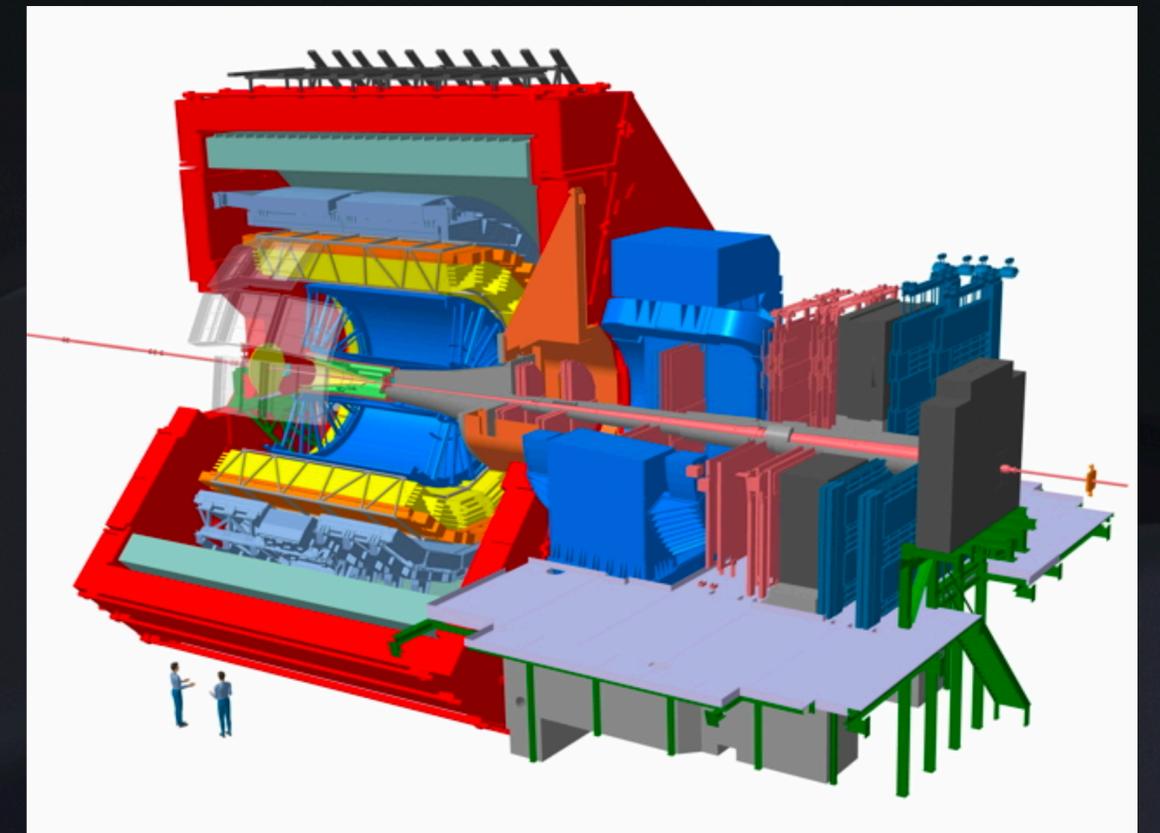
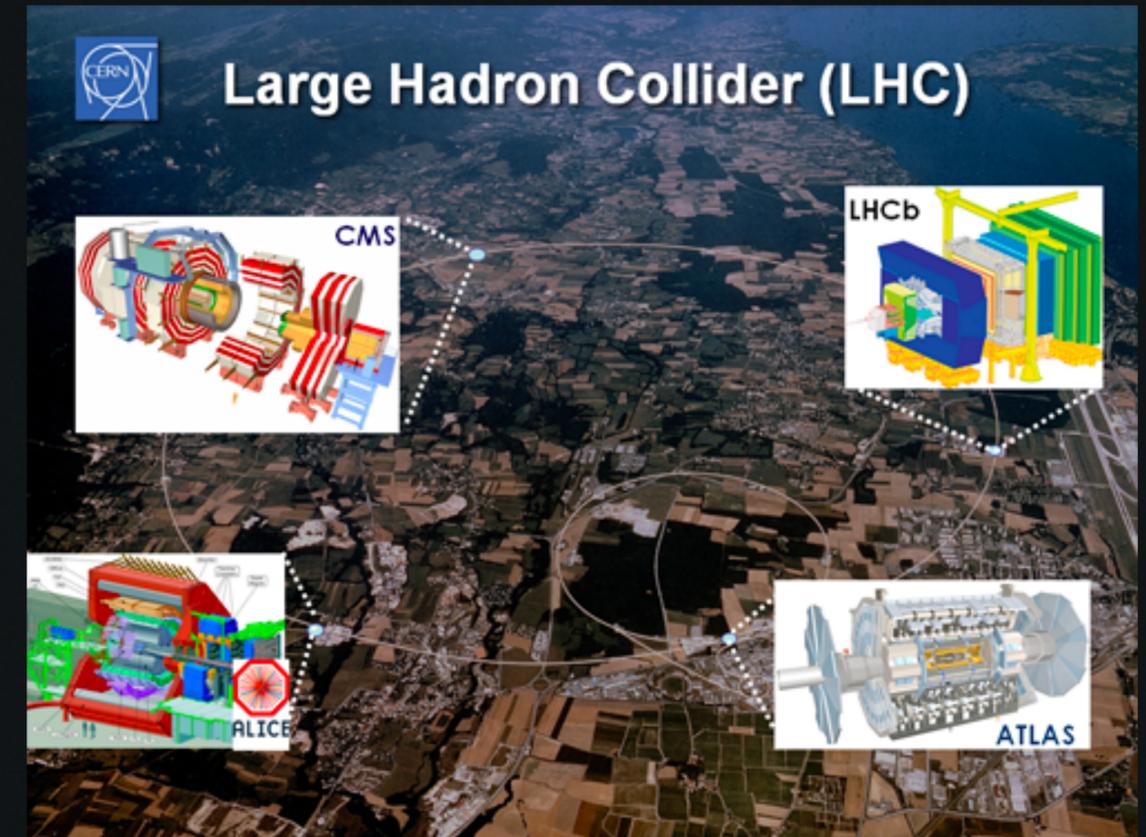
研究背景:LHC-ALICE実験

LHC(Large Hadron Collider)

ヨーロッパ共同原子核研究機構、CERN研究所にある世界最大規模のハドロン衝突型加速器。

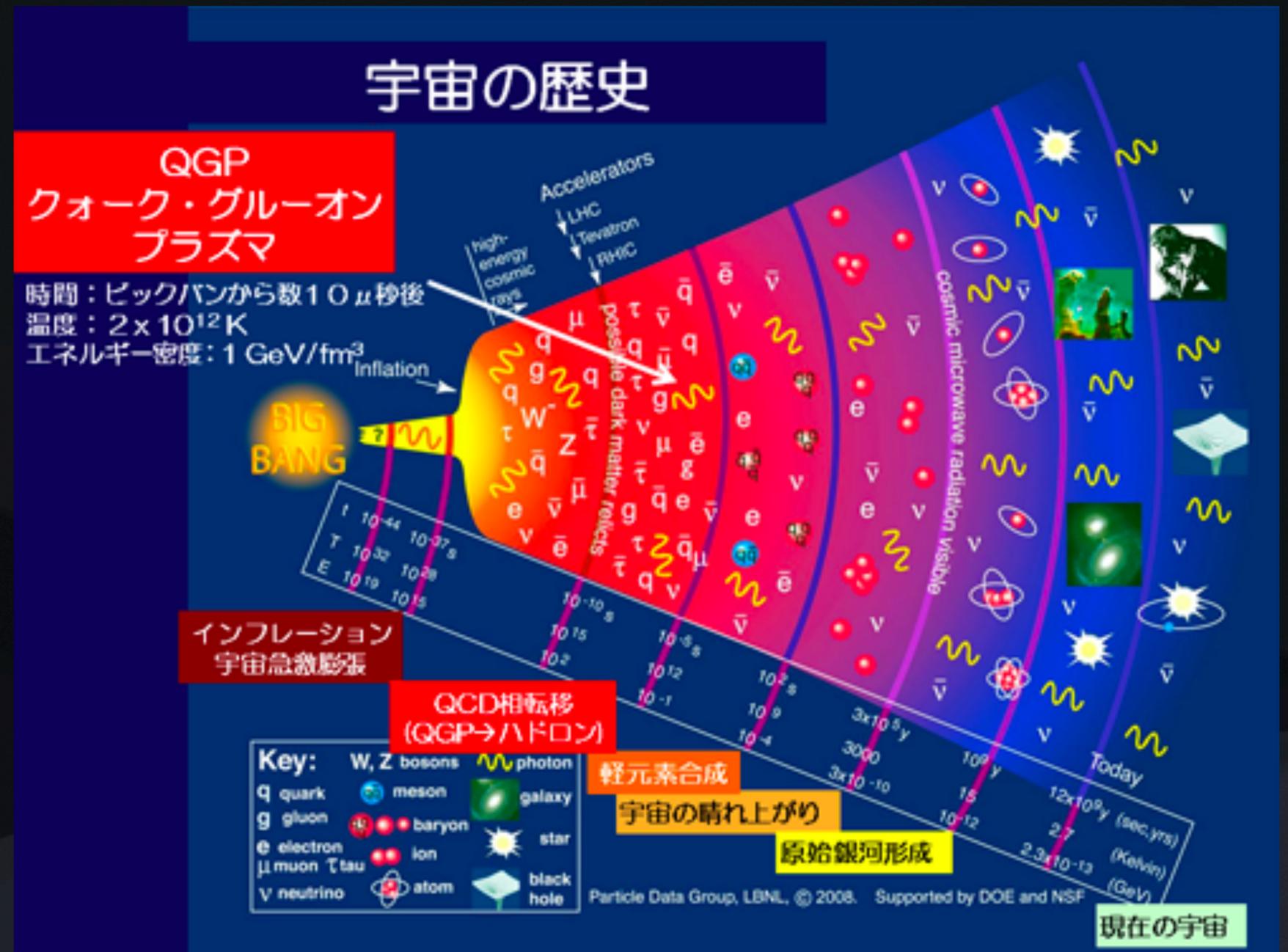
ALICE実験(A Large Ion Collider Experiment)

LHCのうち唯一、重イオン実験とクォーク・グルーオンプラズマ研究に特化した実験。40カ国、170研究機関で行われており、約2000人の研究者が携わっている。

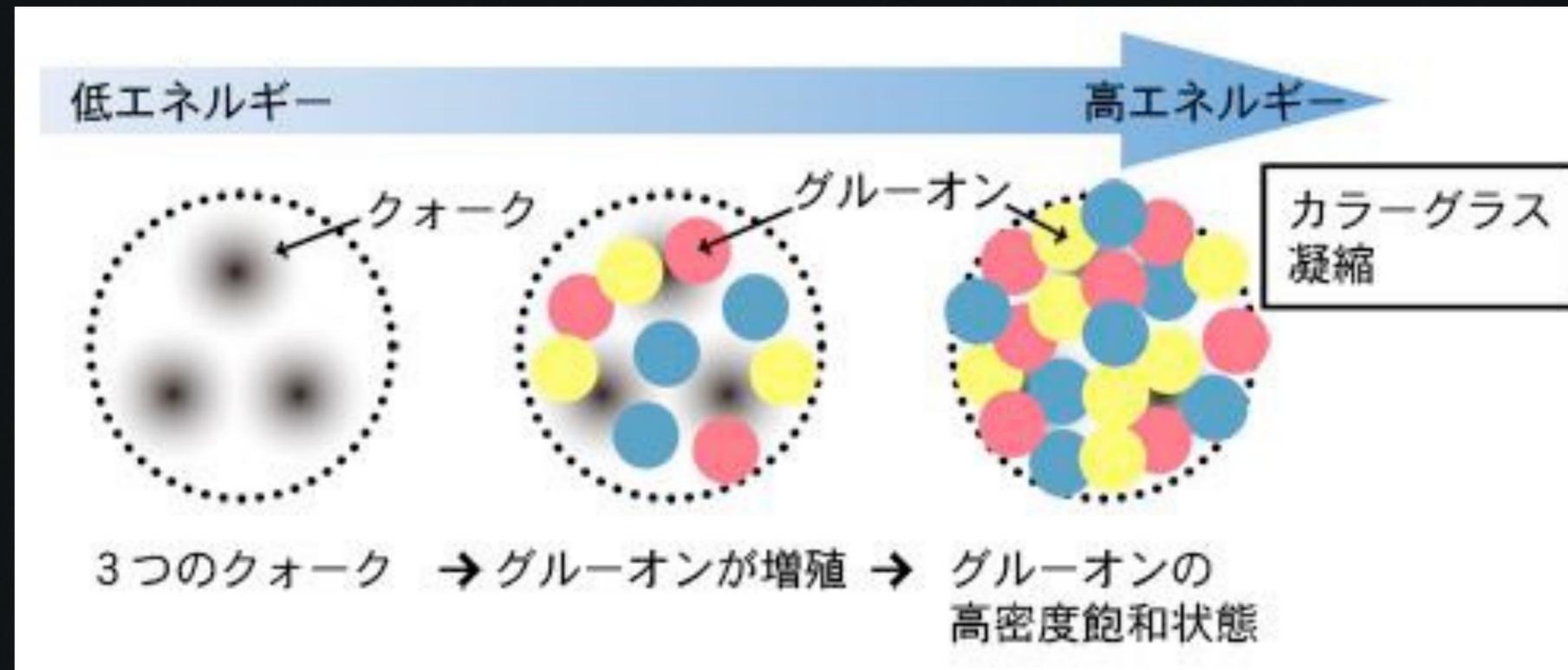


研究背景:クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)

- ビッグバン直後の数 μ 秒から数 10μ 秒間に存在した宇宙の姿
- 通常、強い相互作用で閉じ込められているクォークとグルーオンが高温・高密度状態になるとプラズマ状態になっている。



研究背景: カラーガラス凝縮(CGIC)



核子中のグルーオンの数が増加し、グルーオン同士が融合した高密度飽和状態のこと。

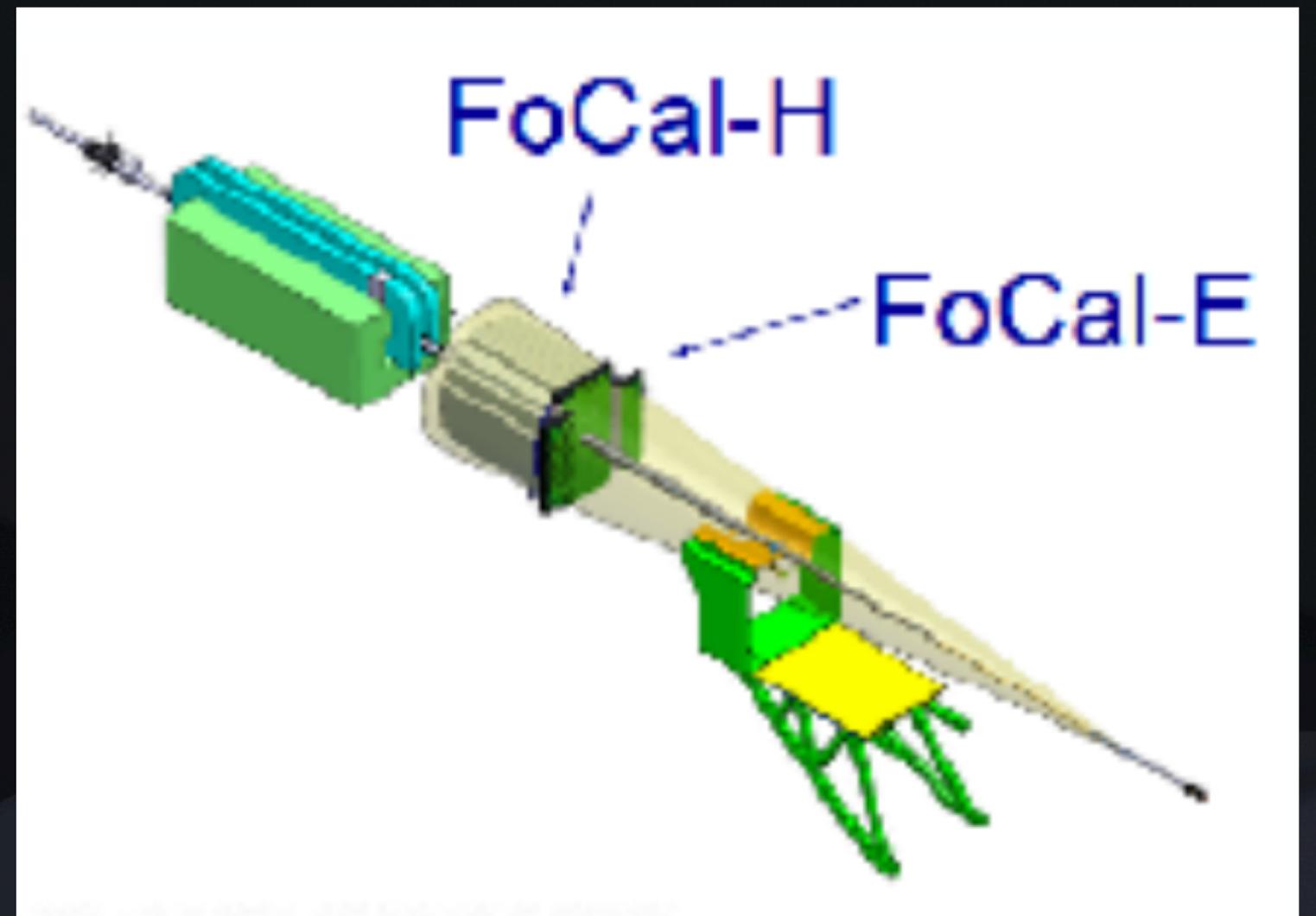
QGP生成するための衝突直前状態とされている。その存在を予言されているが未発見である。

研究背景:Focal(Forward Calorimeter)

- 日本主導のLHC ALICEアップグレード計画。
CGCに感度が高い前方方向の直接光子を測定するための検出器。

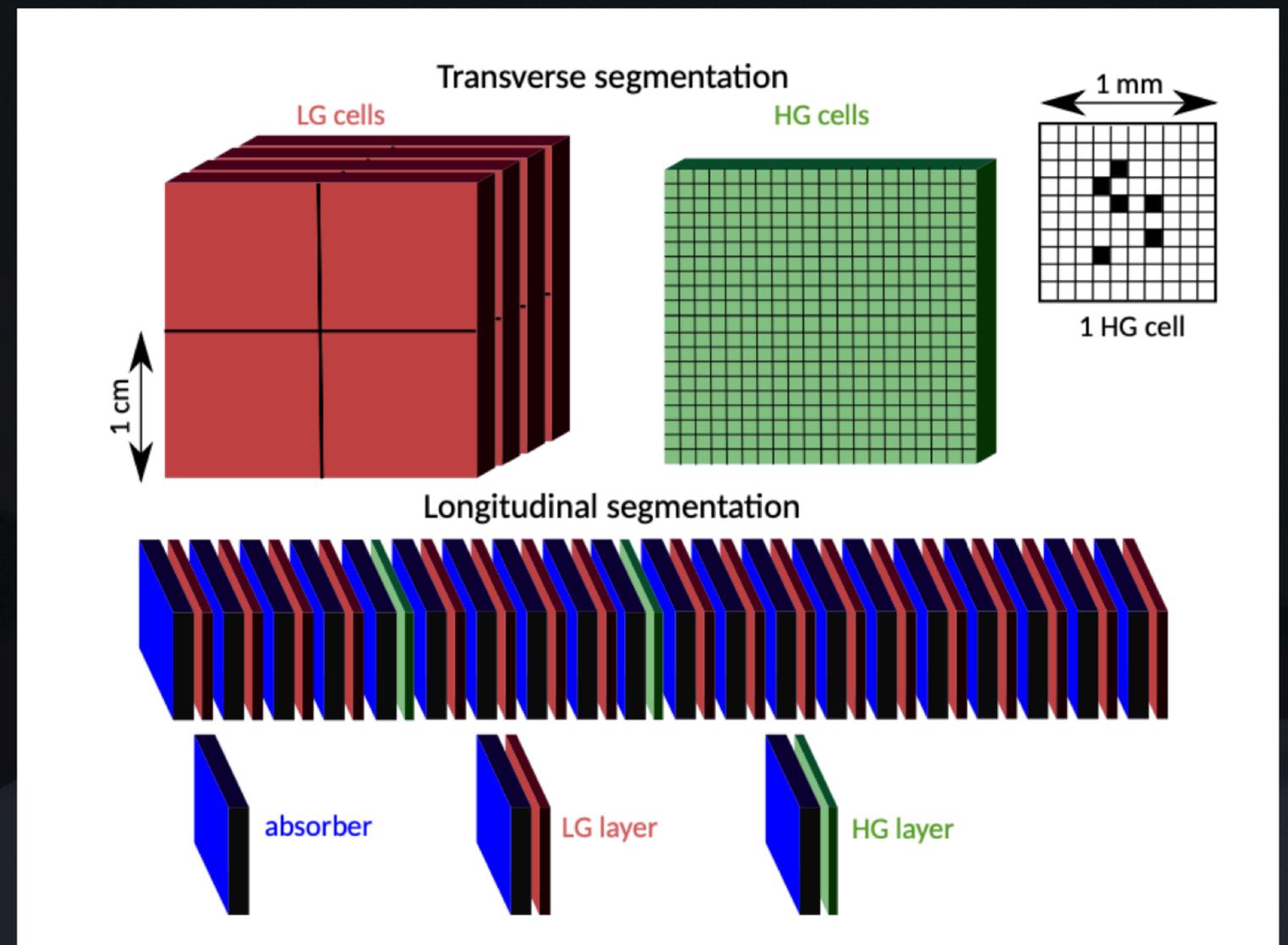
Focal-E シリコン検出器とタングステンの層構造を持つ電磁カロリメータ。直接光子を測定する。

Focal-H 管状に加工された銅を用いた四角柱のカロリメータ。粒子識別及びジェット測定に用いられる



研究背景:Focal-Eの構造について

- 検出層と吸収層が20層ずつ並んでいる。
- エネルギー測定を行うLGL(Low Granularity Layer)と、位置測定を行うHGL(High Granularity Layer)の組み合わせから構成されている。



研究目的

研究目的

Focal検出器で用いられるSi sensorの性能評価のため、精度の良い電荷増幅器の制作

- そのために、まず回路シミュレーションツール(Ltspice)を用いて回路図の設計・シミュレーションを行い、回路に用いる各素子の値の決定を行う。
- 今回は2種類のオペアンプを用いてより良い電荷増幅回路を作成することを試みる。

使用するオペアンプとその特徴

LM6142

低周波で、一般的によく使われ扱いやすい。

特長

特記のない限り、 $V_S = 5V(\text{Typ})$ にて適用。

- 電源電圧までフルスイングの入力 CMVR $-0.25V \sim +5.25V$
- 電源電圧までフルスイングの出力振幅 $0.005V \sim 4.995V$
- 広利得 - 帯域幅積 $17\text{MHz}@50\text{kHz}(\text{Typ})$
- スルーレート
小信号 : $5V/\mu s$
大信号 : $30V/\mu s$
- 低消費電流 $650\mu A/\text{アンプ}$
- 広電源電圧範囲 $1.8V \sim 24V$
- CMRR 107dB
- 利得 $108\text{dB}(R_L = 10k)$
- PSRR 87dB

OPA846

高周波で、速い信号に対応。CSAのバイアス電流が大きくノイズに弱い

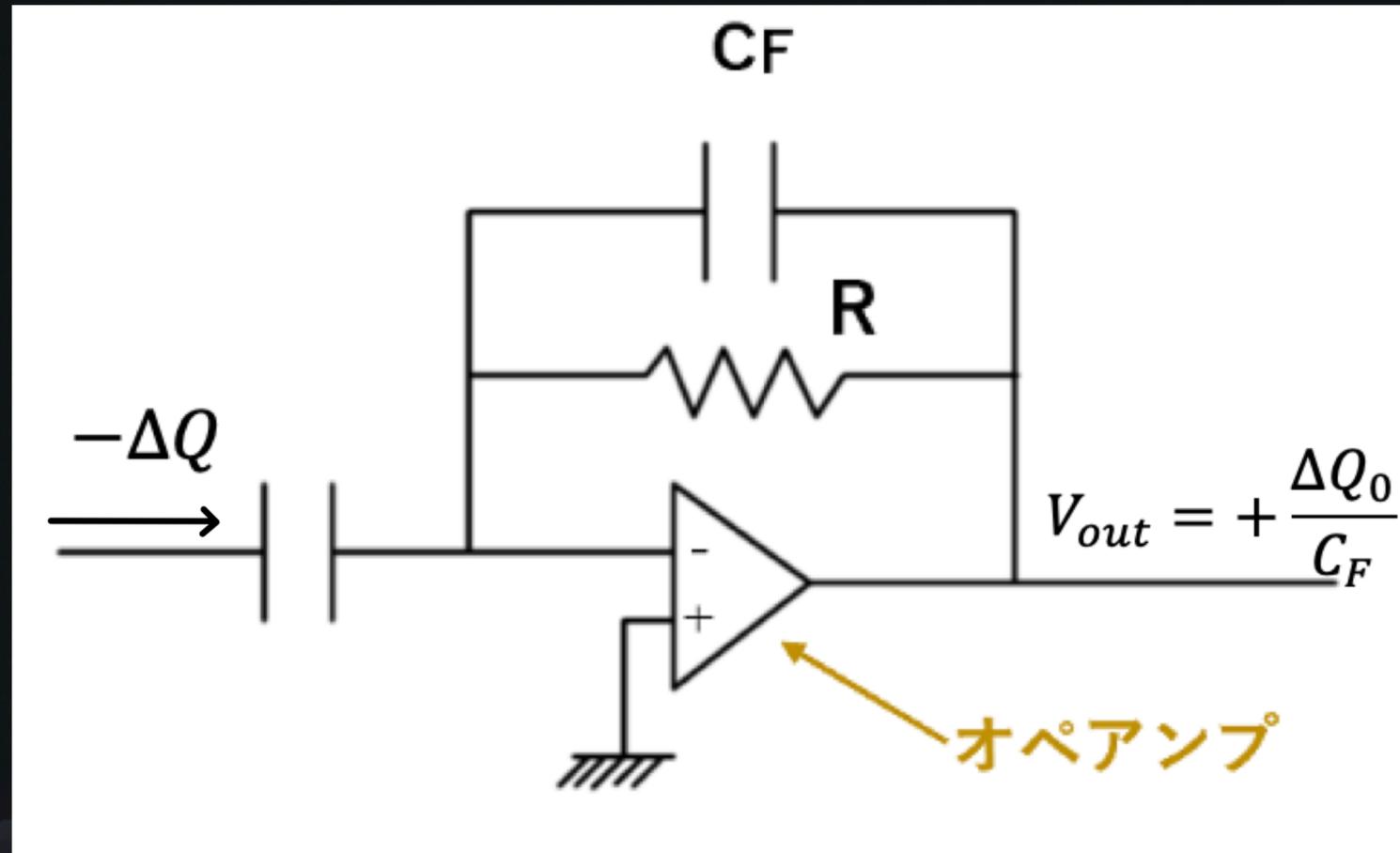
FEATURES

- HIGH BANDWIDTH: 400MHz ($G = +10$)
- LOW INPUT VOLTAGE NOISE: $1.2\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- VERY LOW DISTORTION: -100dBc (5MHz)
- HIGH SLEW RATE: $625\text{V}/\mu s$
- HIGH DC ACCURACY: $V_{IO} \pm 150\mu V$
- LOW SUPPLY CURRENT: 12.6mA
- HIGH GAIN BANDWIDTH PRODUCT: 1750MHz
- STABLE FOR GAINS ≥ 7

LM6142を使ってまずは試作を試みる。その上で、より高性能なOPA846で、性能が向上するかどうかを調べる

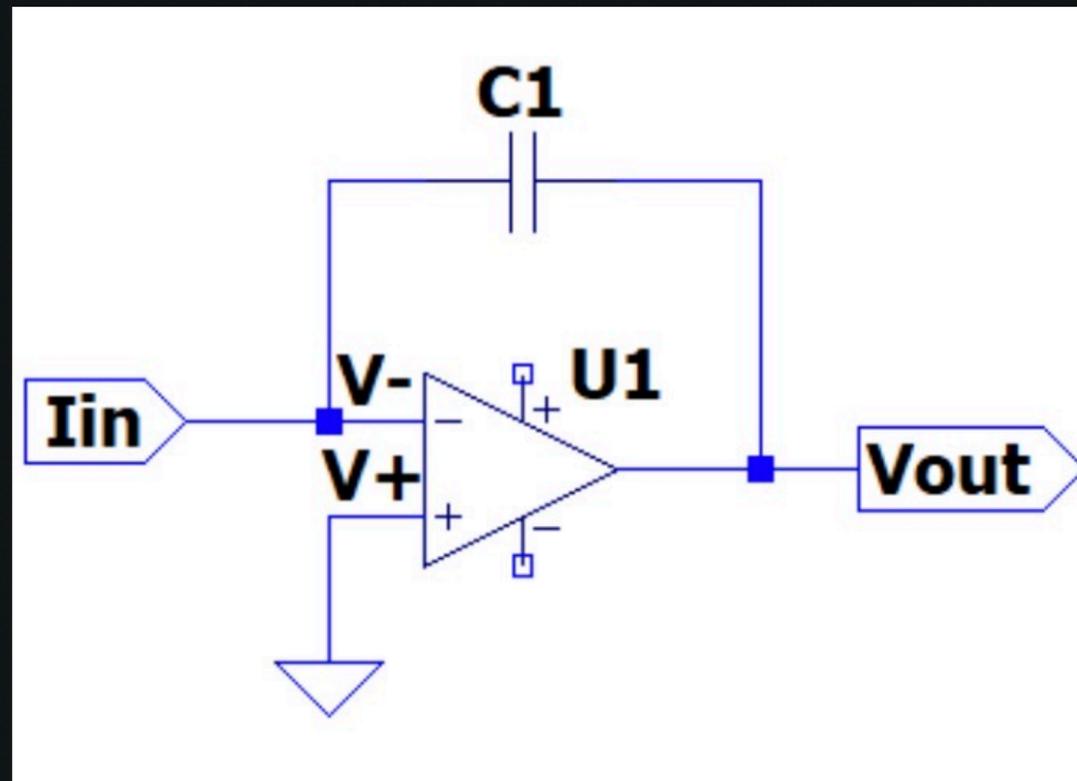
シミュレーションの作成

電荷測定の方法

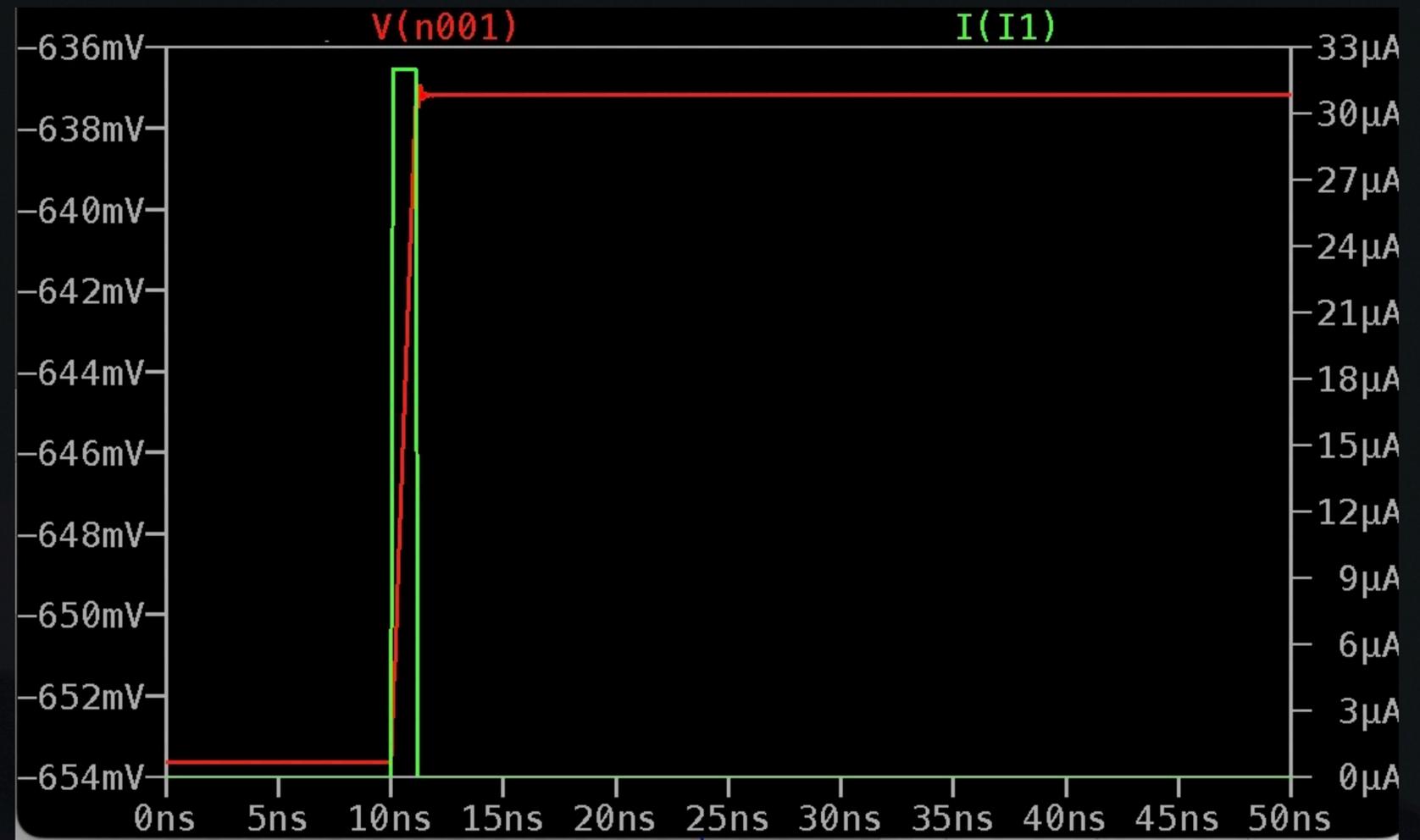


- 電荷敏感増幅器(CSA)を用い、微小な電流信号を電圧信号に変換し測定する。(反転増幅)
- コンデンサーに電荷を貯めて電圧に変換する
- コンデンサーだけでは連続的なパルスに対応できない→コンデンサーに抵抗をつなぐ
- 電流が抵抗を通ることで電圧降下が起きるので、出力をベースラインに戻せる

荷電増幅器の回路図とシミュレーション



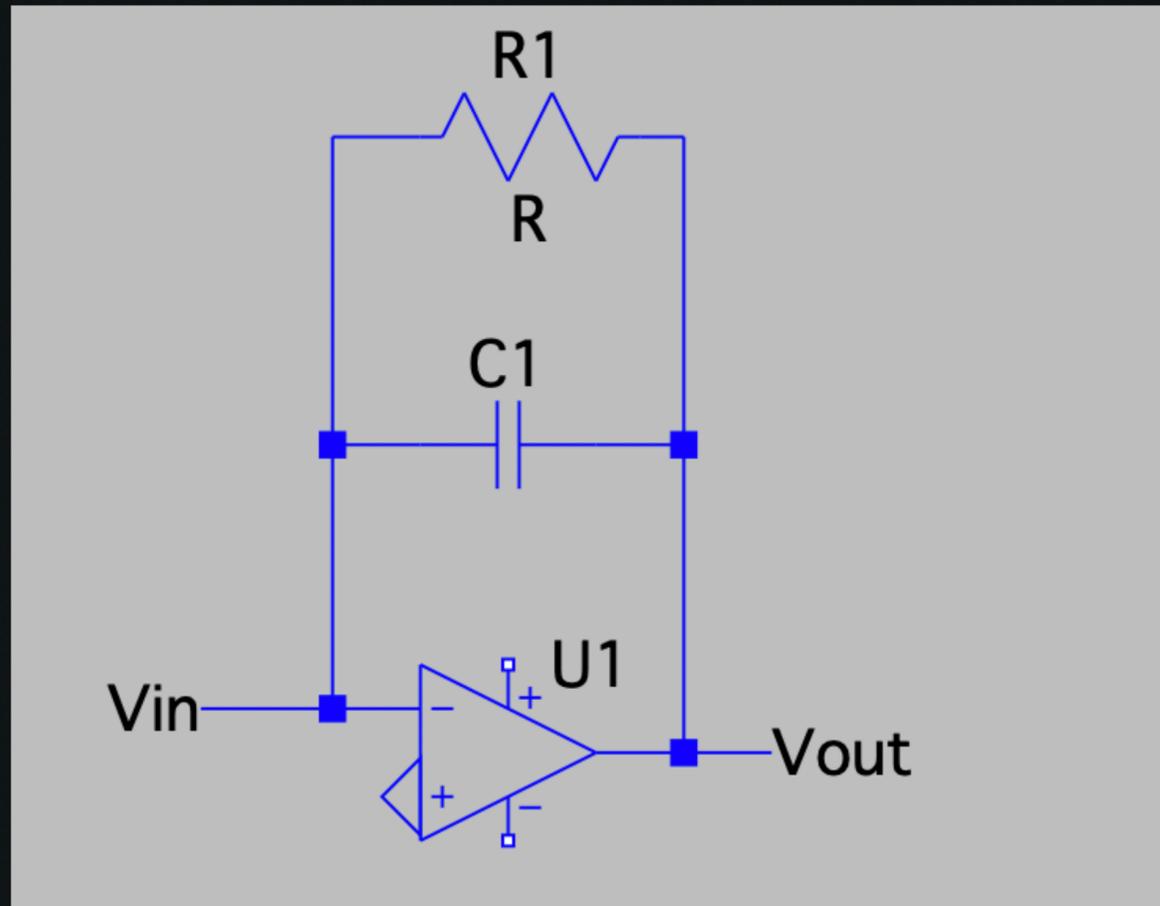
抵抗なしの荷電増幅器の回路図



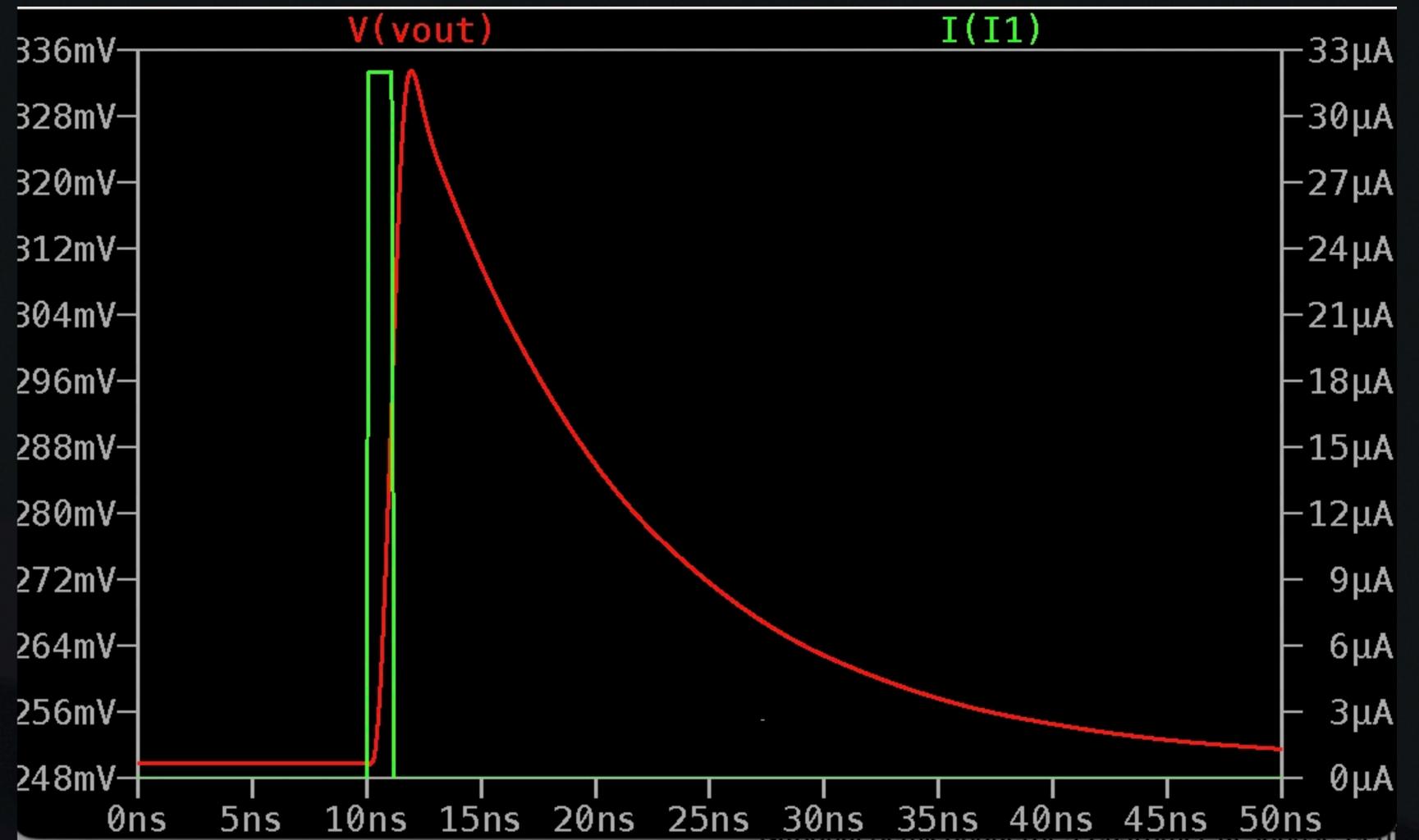
横軸:時間、縦軸左:電圧値、縦軸右:電流値

入力電流がきちんと積分されている結果が確認できる。しかし、このままでは連続的にパルスが流入した際に毎回積分されて足し合わされてしまうため、都合が悪い。

抵抗を並列に加えた荷電増幅器の回路図とシミュレーション



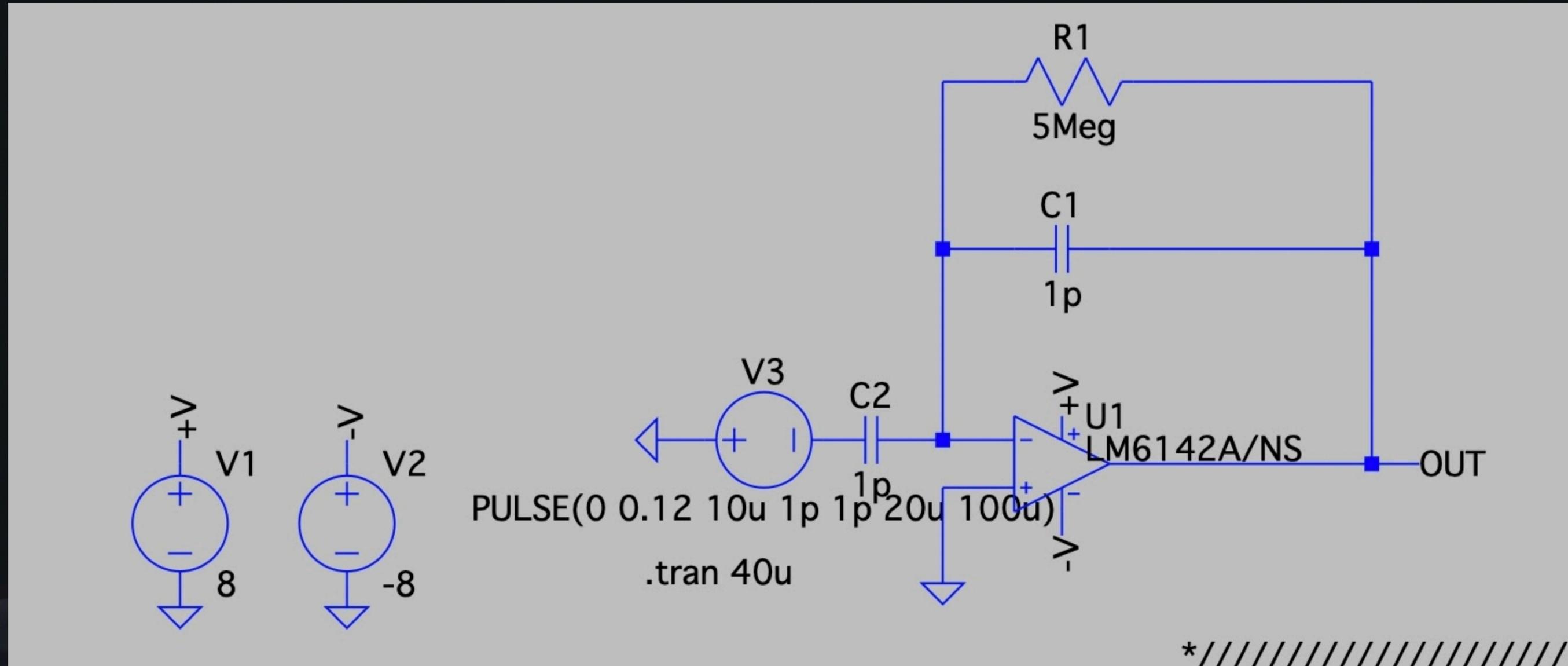
荷電増幅器の回路図



横軸:時間、縦軸左:電圧値、縦軸右:電流値

電流が抵抗を通ることで電圧降下が起き、連続的なパルスに対応可能な電荷増幅器となる。

LM6142の回路図

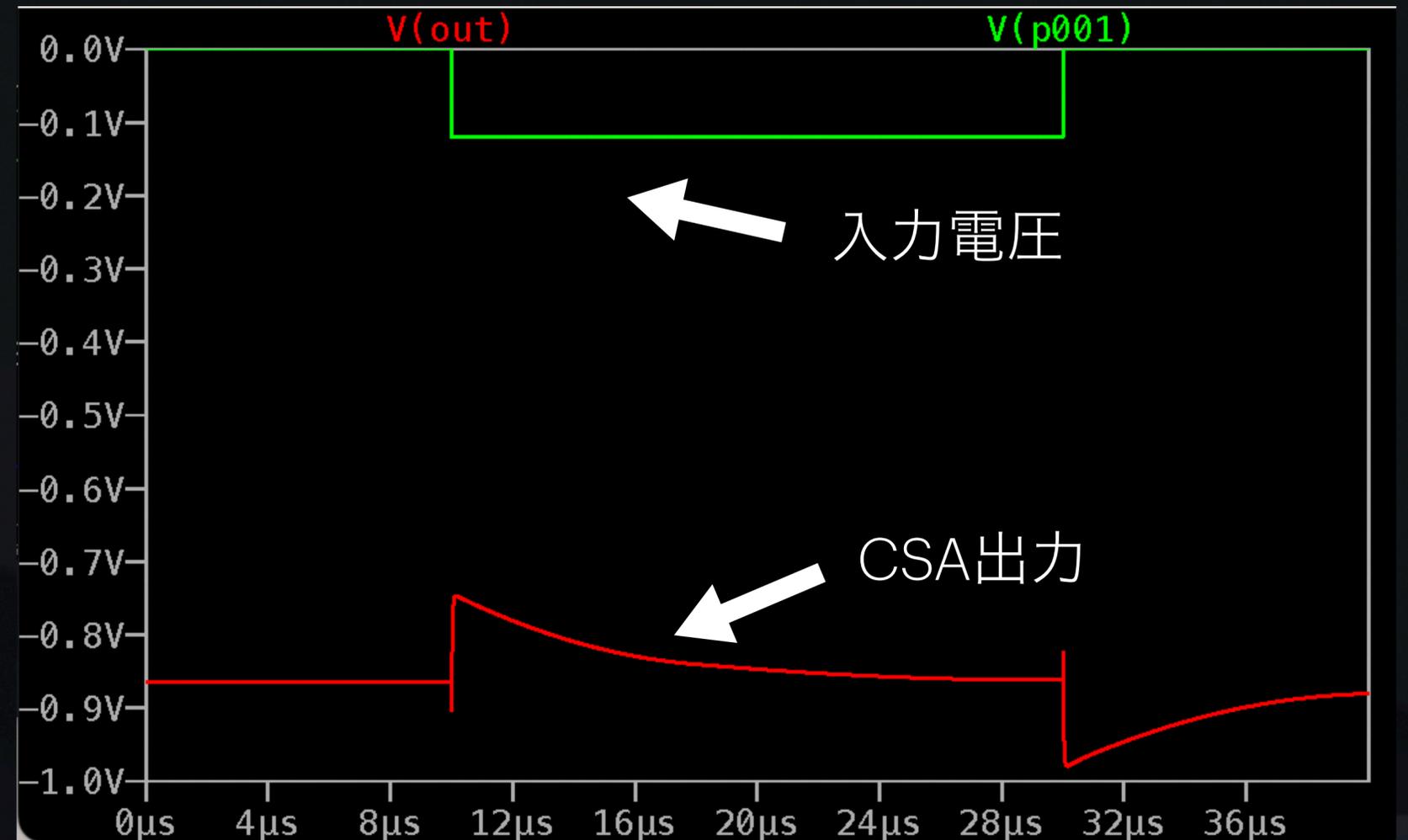


CSA回路。時定数は $1\text{pF} \times 5\text{M}\Omega = 5\mu\text{s}$ 。抵抗は $5\text{Meg}\Omega$ 、コンデンサーは 1pF を使用。

LM6142 CSAシミュレーション結果

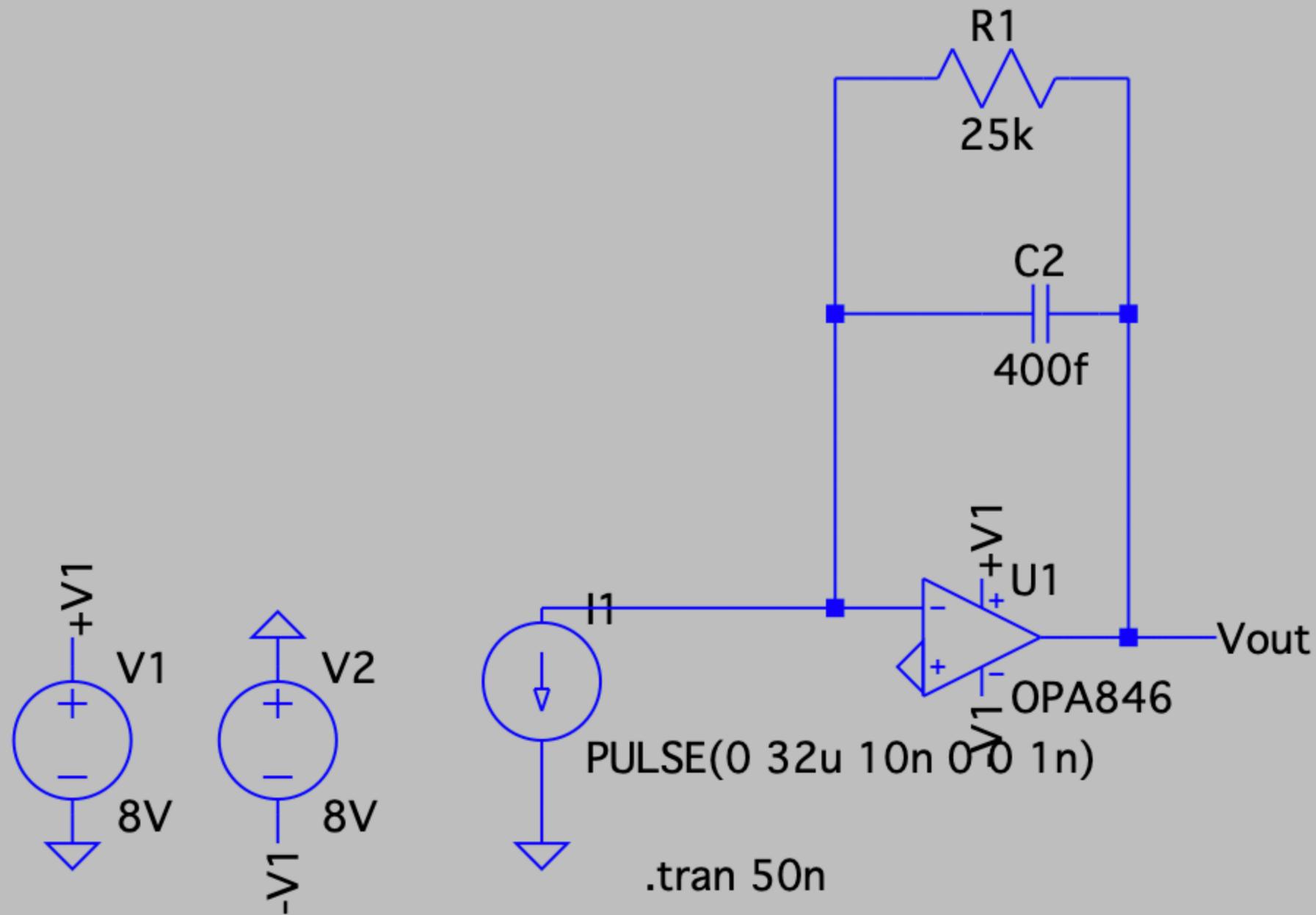
- 緑線が入力波形、赤線が出力波形
- 矩形波の横幅を $20\mu\text{s}$ 、縦幅を 100mV とし、実際の入力波形に揃えた
- 時定数 $CR=1\text{pF}\times 5\text{M}\Omega=5\mu\text{s}$ となっていることが右図からわかる。

→電荷増幅器のシミュレーションに成功



横軸:時間、縦軸左:電圧値

OPA846で制作した回路図

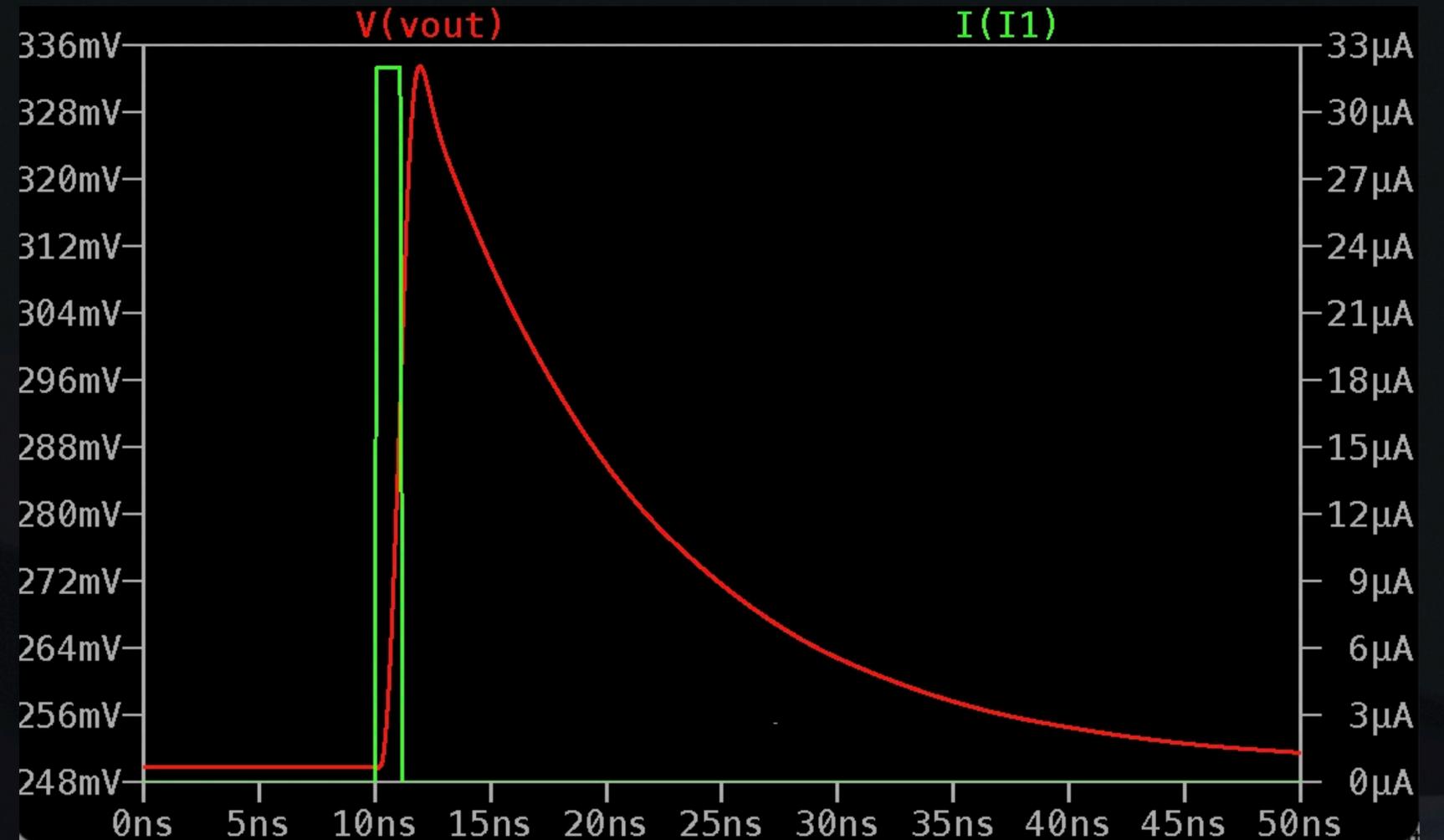


- LM6142よりコンデンサーと抵抗の値を小さく取っている。(コンデンサーの値が小さい方が応答速度が高い)
- 抵抗値は25k Ω 、コンデンサーは400fF。
- 時定数は400f \times 25k=10ns

OPA846シミュレーション結果

- 緑線が入力波形、赤線が出力波形になっている。
- 出力が立ち上がった後ベースラインに戻る様子を確認できる

→電荷増幅器のシミュレーションを作成に成功

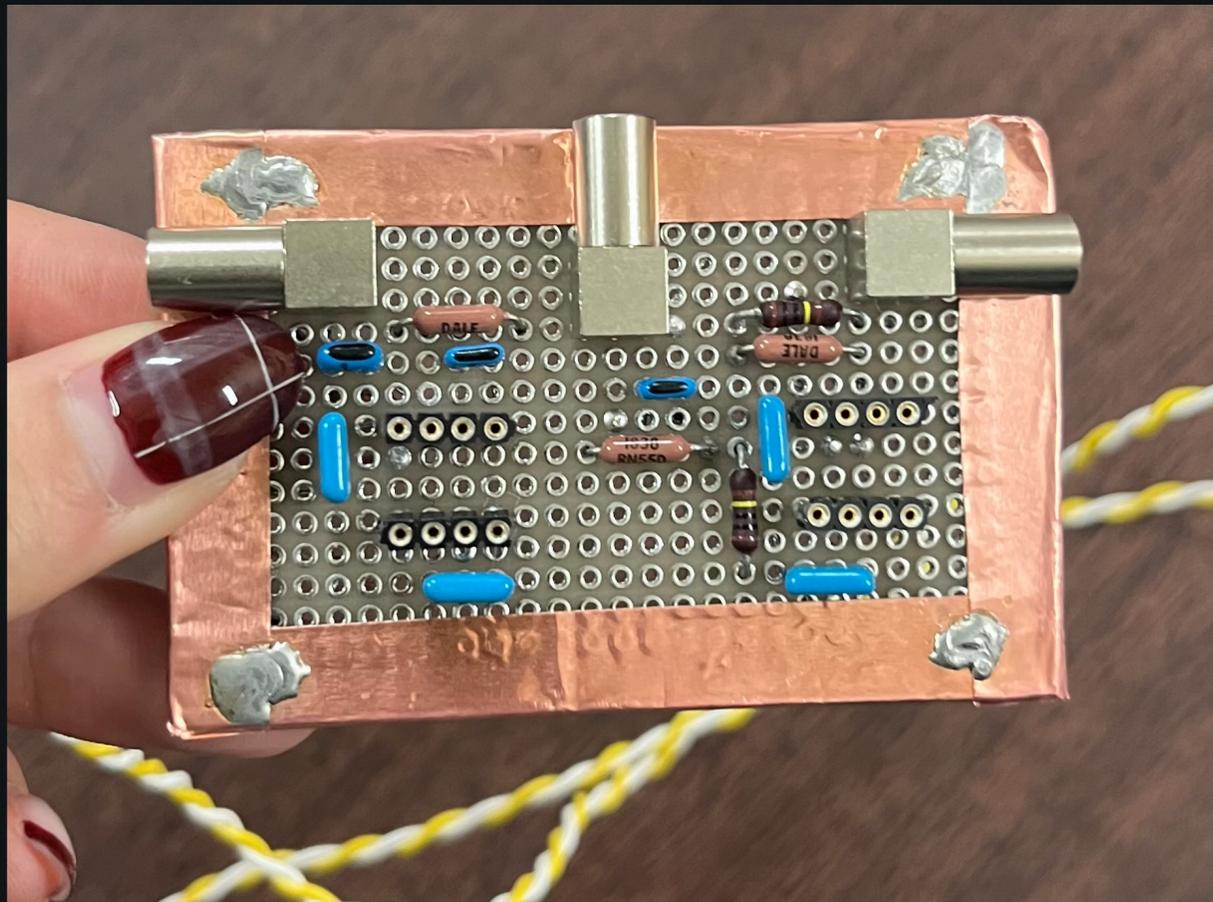


横軸:時間、縦軸左:電流値

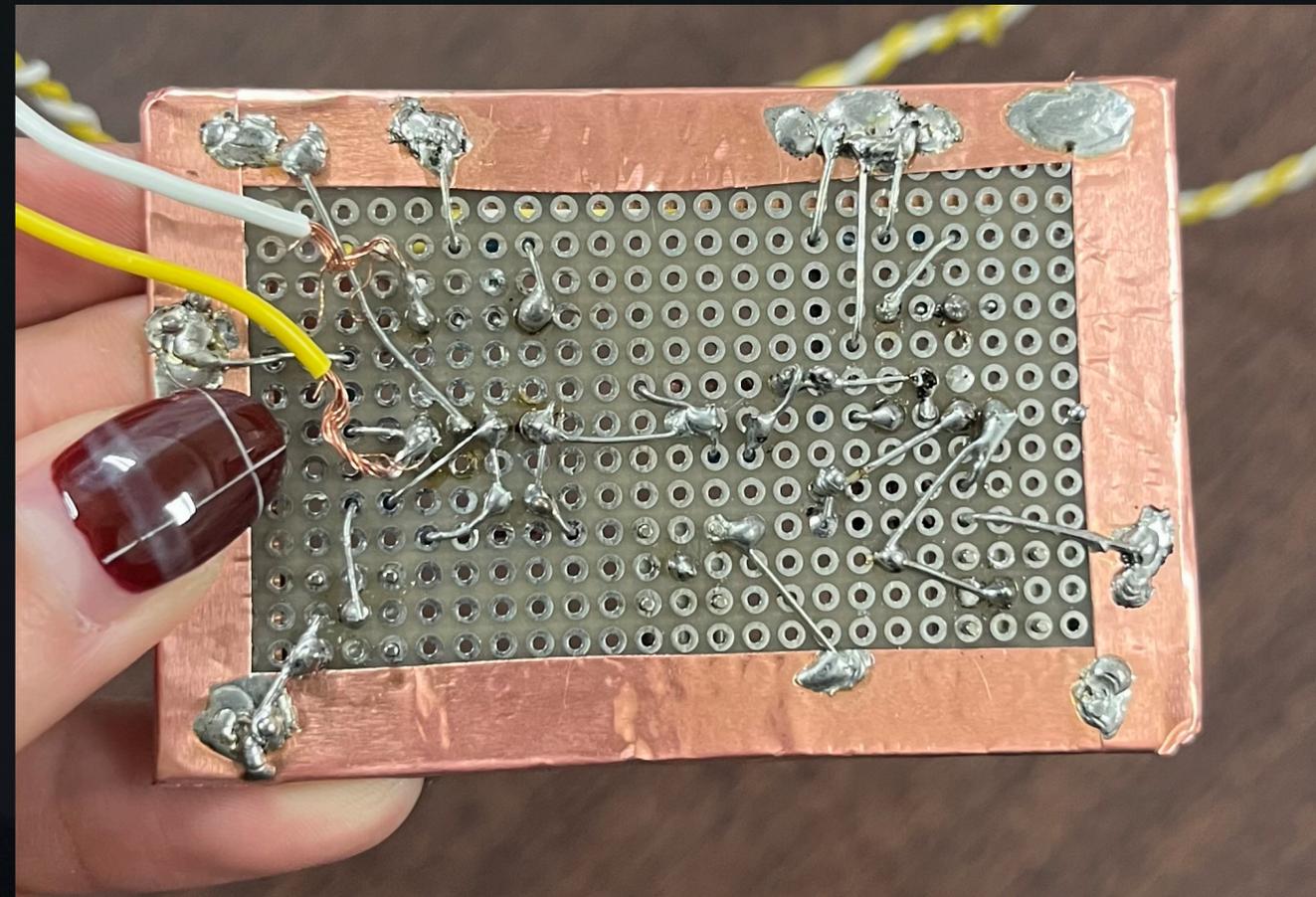
測定準備・測定方法

シミュレーションで波形の予測ができたので、次に実際に電荷増幅器を作り、測定を試みる

実際に製作した基板



基板の表面



基板の裏面

この基板をクロックジェネレータ、オシロスコープ、電源装置に接続して出力を確認した

セットアップの概略図



- クロックジェネレータで生み出した微小なNIMパルスをオシロスコープに送っている。
- 又、電源装置を用いてオペアンプに電圧をかけている。
- オシロスコープで入力、出力のパルスを測定する。

セットアップの様子



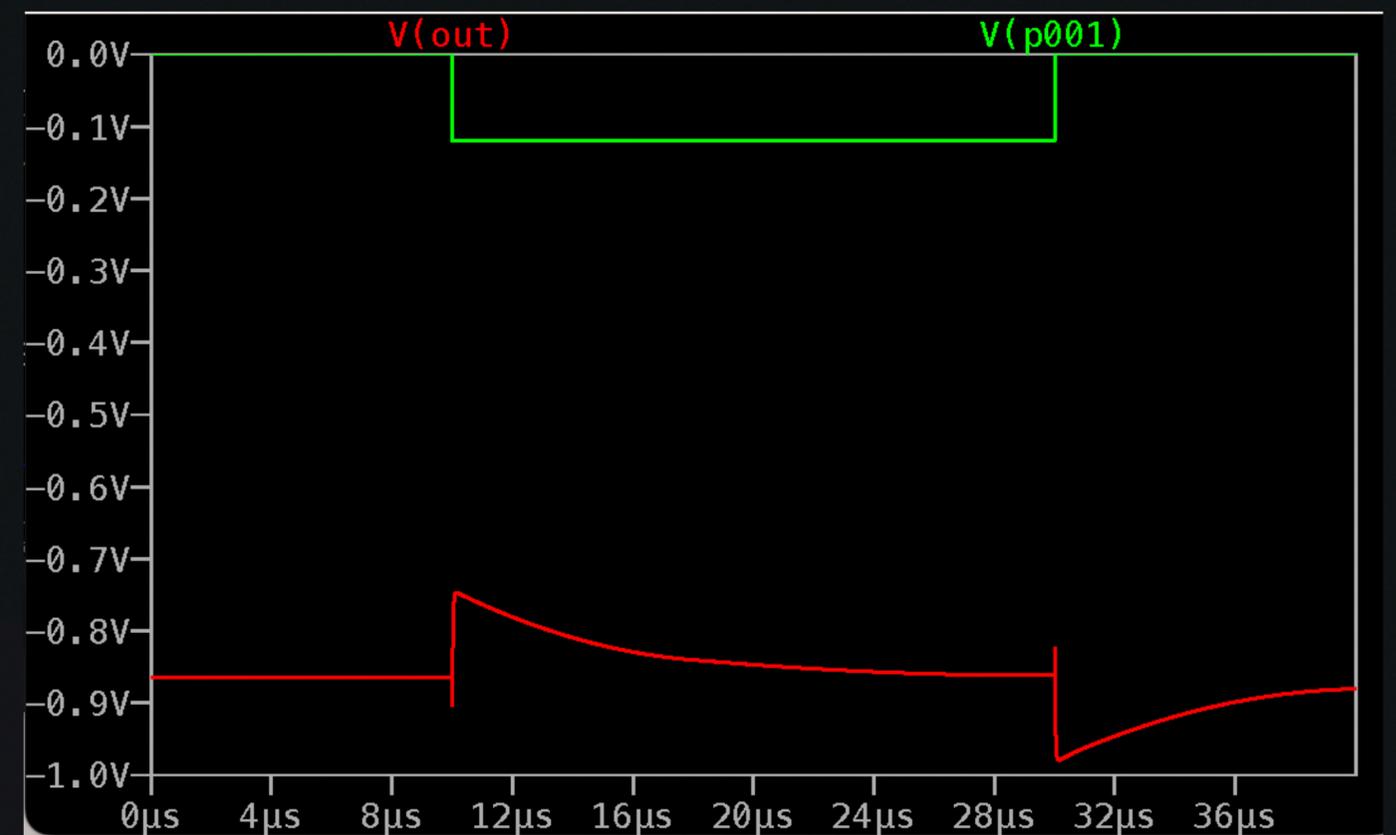
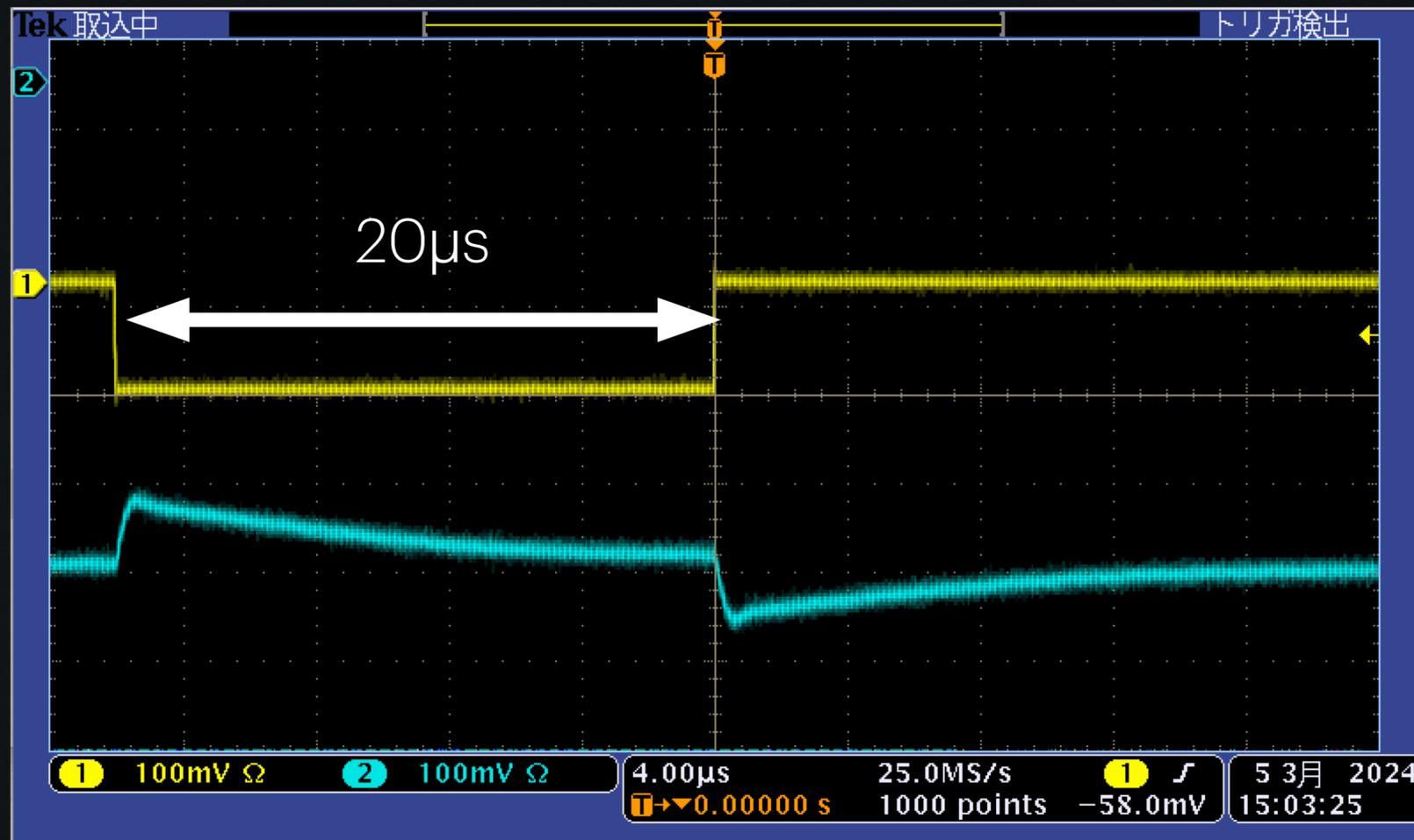
オシロスコープ

電源装置

自作の電荷アンプ

クロックジェネレータ

LM6142 CSA結果



シミュレーション 横軸:時間、縦軸左:電圧値

- 時定数 $CR=1\text{pF}\times 5\text{M}\Omega=5\mu\text{s}$ となっていることが結果からわかる。
- シミュレーションと同様の波形が見えた。

→電荷敏感増幅器の制作に成功

まとめ・今後の課題

まとめと今後の課題

- LM6142、OPA846を用いたシミュレーションで目標としている出力の確認に成功している
- LM6142の基板の動作確認で目標としていた出力の確認に成功している
- OPA846に関しては基盤を制作したが、見える波形を確認できていないので、基板に修正を加える。
- LM6142については、フォロワー回路を更に加えて性能が上がるかどうか確認する。