

**THIẾT KẾ BỘ PHÁT BLE 2.4GHz
KẾT HỢP BỘ WAKE-UP RECEIVER (WuRx)**

ĐỀ TÀI 4: Sensor node BLE & Directional coupler

NHÓM 7:

LÊ HOÀNG HUY

2211189 **25%**

GVHD: TS. NGUYỄN VĂN HIẾU

PHẠM LỘ HOÀNG KHANG

2211464 **25%**

TRẦN HOÀNG KIÊN

2211736 **25%**

PHƯƠNG HIỂN LONG

2211898 **25%**

AGENDA

- 1. TỔNG QUAN ĐỀ TÀI** (Long)
- 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT** (Huy + Khang)
- 3. SENSOR NODE BLE** (Long + Kiên)
- 4. DIRECTIONAL COUPLER** (Khang)
- 5. KẾT LUẬN VÀ ĐÁNH GIÁ** (Khang)
- 6. TÀI LIỆU THAM KHẢO**
- 7. Q&A**

1. TỔNG QUAN ĐỀ TÀI

- Tổng quan
- Nhiệm vụ đề tài
- Phân chia nhiệm vụ

Long
(1 min)

TỔNG QUAN VỀ ĐỀ TÀI

- Đề tài tập trung vào thiết kế một sensor node BLE, bao gồm phát triển phần cứng với SoC (ESP32-C3) và PCB tích hợp cảm biến (nhiệt độ, độ ẩm, ánh sáng) cùng mạch nguồn, nhằm đảm bảo hiệu suất tín hiệu tối ưu.
- Đồng thời, đề tài thiết kế directional coupler (coupler B) với hệ số coupling từ -10 dB đến -20 dB, sử dụng công nghệ microstrip line trên substrate FR4, để tách tín hiệu giữa đường chính (TX/RX) và đường phụ dẫn tới Wake-Up Receiver (WuRx).

CÁC NHIỆM VỤ CẦN ĐƯỢC HOÀN THÀNH

Nội dung 1: Node soc BLE

- Chọn SoC ESP32-C3, thiết kế schematic và PCB tích hợp cảm biến và mạch nguồn.
- Schematic hoàn chỉnh, PCB layout với kích thước tối ưu, tương thích giao tiếp RF 50 Ω.
- Firmware hỗ trợ advertising/notification data payload, quản lý power states (sleep/active), và interrupt từ GPIO_WU.
- Tối ưu năng lượng với sleep mode, duty cycle, và bật/tắt PA khi TX.
- Firmware hoạt động ổn định, gửi dữ liệu cảm biến qua BLE, đo dòng sleep/active và round-trip time (RTT).

CÁC NHIỆM VỤ CẦN ĐƯỢC HOÀN THÀNH

Nội dung 2: Thiết kế Directional coupler (coupler B)

- Thiết kế Directional Coupler với hệ số coupling từ -10 dB đến -20 dB, mô phỏng S-parameters (S_{11} , S_{21} , S_{31} , isolation, phase) trên ADS.
- Chế tạo PCB coupler và đo kiểm thực tế.

PHÂN CHIA NHIỆM VỤ

STT	Mã số SV	Họ	Tên	Nhiệm vụ được phân công	Phần trăm tham gia công việc
1	2211189	Lê Hoàng	Huy	Viết firmware, thiết kế schematic, PCB node và layout	25%
2	2211464	Phạm Lộ Hoàng	Khang	Thiết kế và mô phỏng directional coupler, hoàn thiện báo cáo	25%
3	2211736	Trần Hoàng	Kiên	Viết firmware và tích hợp cảm biến	25%
4	2211898	Phương Hiển	Long	Thiết kế PCB node, coupler và layout	25%

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

- Khái niệm SoC
- Lý thuyết BLE
- RTT
- Deep Sleep
- Coupler & Directional Coupler

Huy + Khang
(2 mins)

KHÁI NIỆM SOC

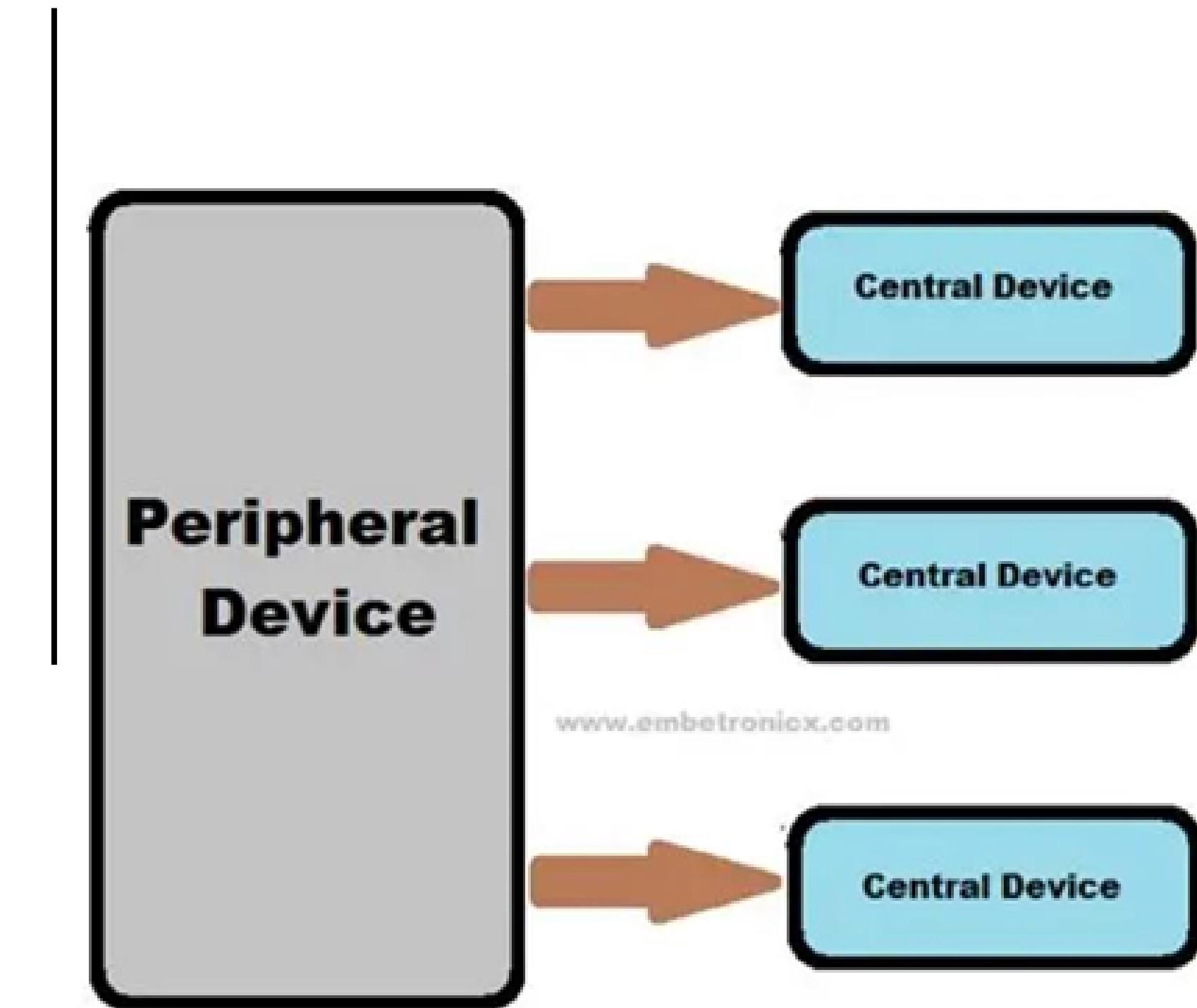


Soc là giải pháp tích hợp 1 chip gồm vi xử lý, bộ nhớ, radio transceiver và phần mềm giao thức để giao tiếp BLE.

ESP32-C3 Super Mini là kit siêu nhỏ gọn dùng chip RISC-V ESP32-C3 tích hợp Flash 4MB, hỗ trợ Wi-Fi 2.4 GHz và BLE 5.0, rất hợp cho ứng dụng IoT/AIoT.

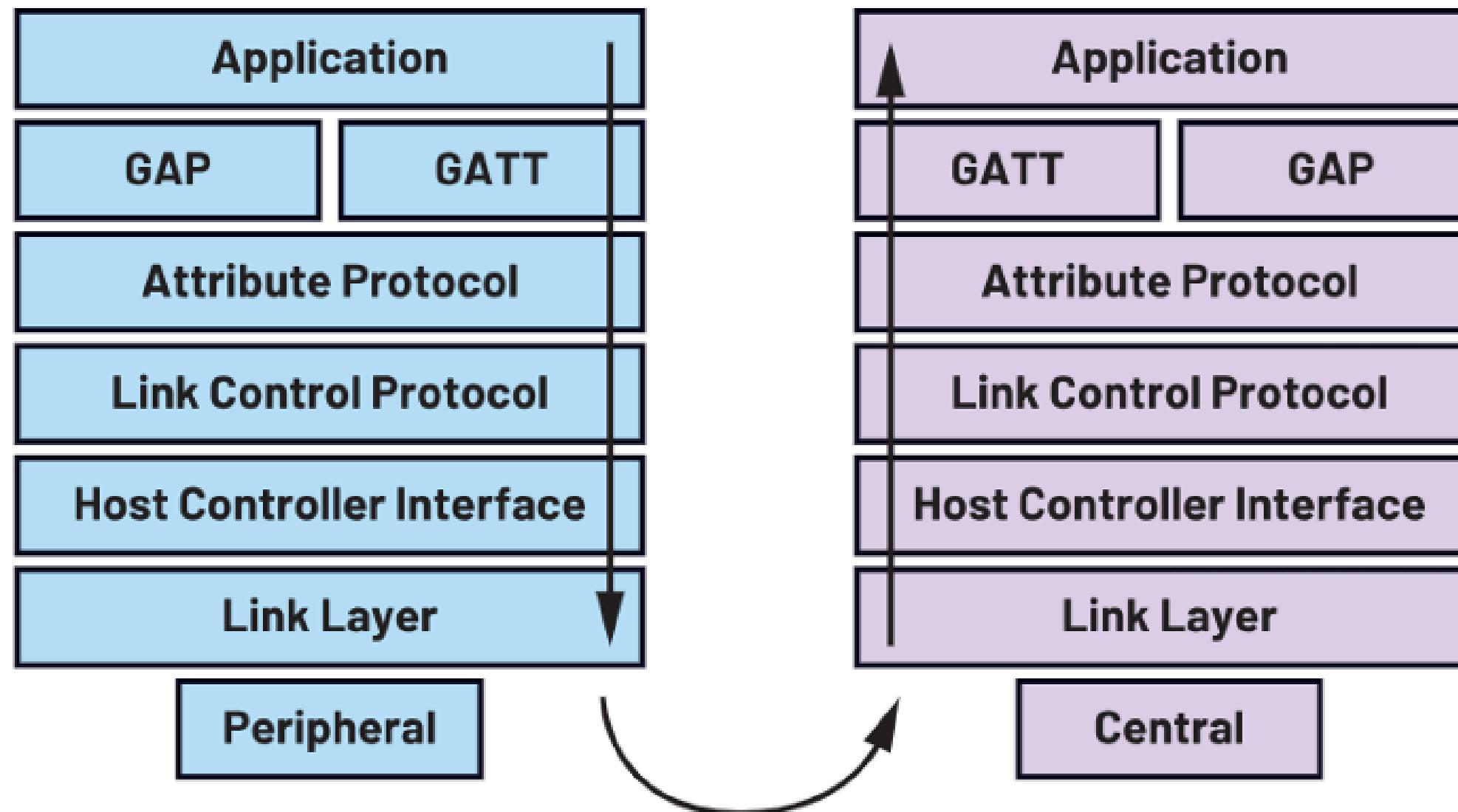
LÝ THUYẾT BLE

BLE là chuẩn kết nối không dây năng lượng thấp cho IoT, trong đó peripheral quảng bá (advertising) thông tin như tên/UUID để central phát hiện và kết nối



Advertising Mode – Sends packets to many

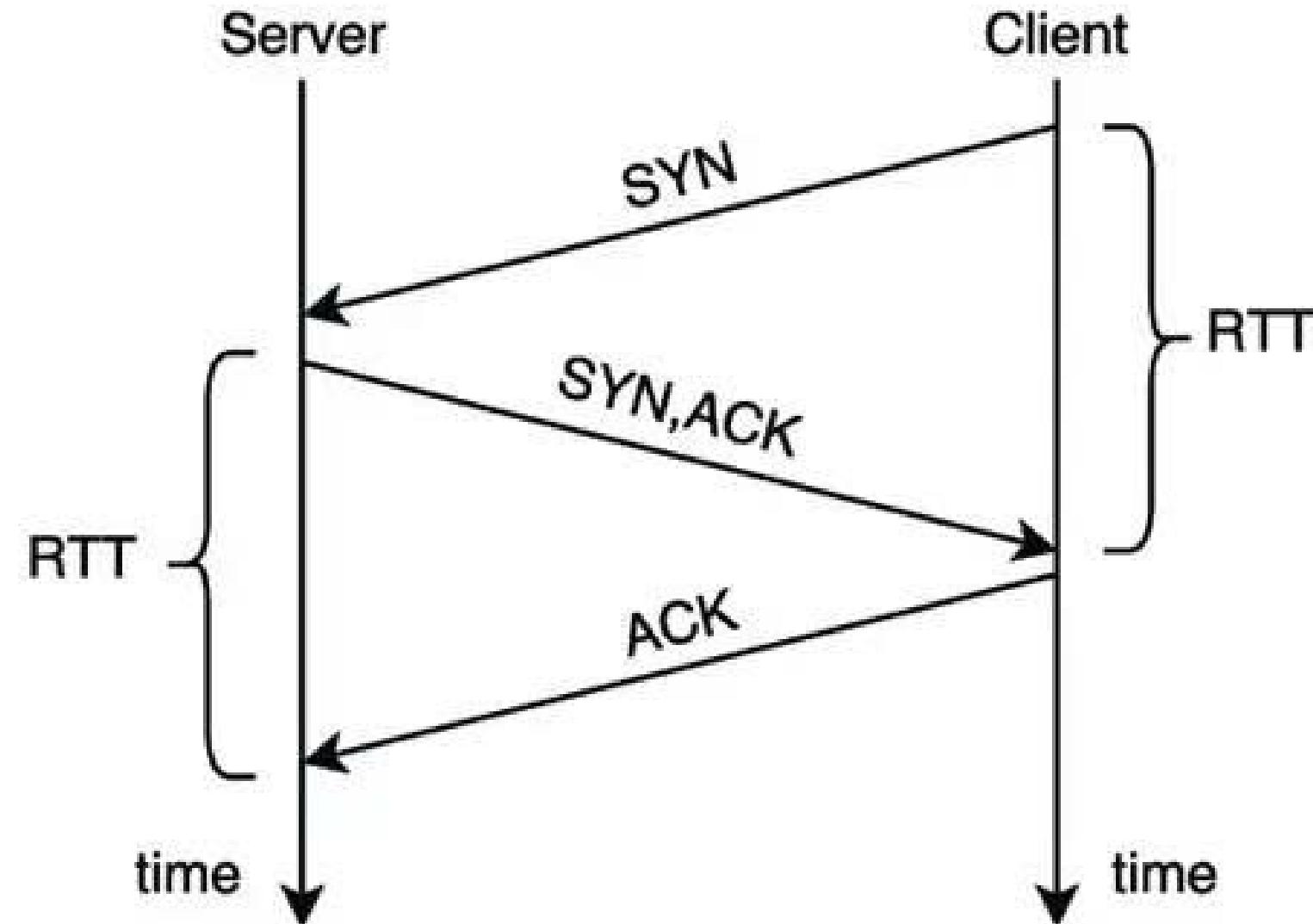
LÝ THUYẾT BLE



Khi central kết nối với peripheral, dữ liệu được trao đổi theo GATT, tổ chức thành các service và characteristic (mỗi characteristic lưu một giá trị để client đọc/nhận).

BLE cho phép server tự gửi dữ liệu cho client bằng Notify (không cần xác nhận) hoặc Indicate (có xác nhận), nên quy trình cơ bản là peripheral quảng bá → central kết nối → khám phá service/characteristic → đọc/ghi hoặc bật notify để nhận dữ liệu tự động khi thay đổi.

ROUND-TRIP TIME



RTT (Round-Trip Time) là thời gian khứ hồi: thời gian từ lúc gửi một gói tin đến khi nhận được phản hồi tương ứng từ bên kia.

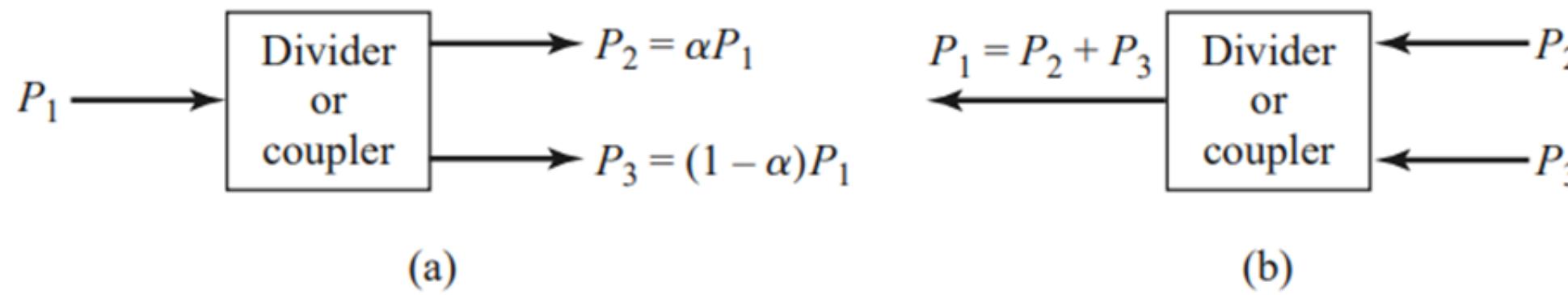
DEEP SLEEP

Chế độ tiết kiệm năng lượng sâu nhất: CPU, Wi-Fi/BLE và hầu hết ngoại vi tắt hoàn toàn, chỉ còn mạch RTC/ULP hoạt động để giữ thời gian và đánh thức chip. Khi tỉnh dậy, ESP32 reset và chạy lại từ đầu (nhưng có thể giữ một ít dữ liệu trong RTC memory).

ESP32 Deep Sleep Mode



COUPLER & DIRECTIONAL COUPLER



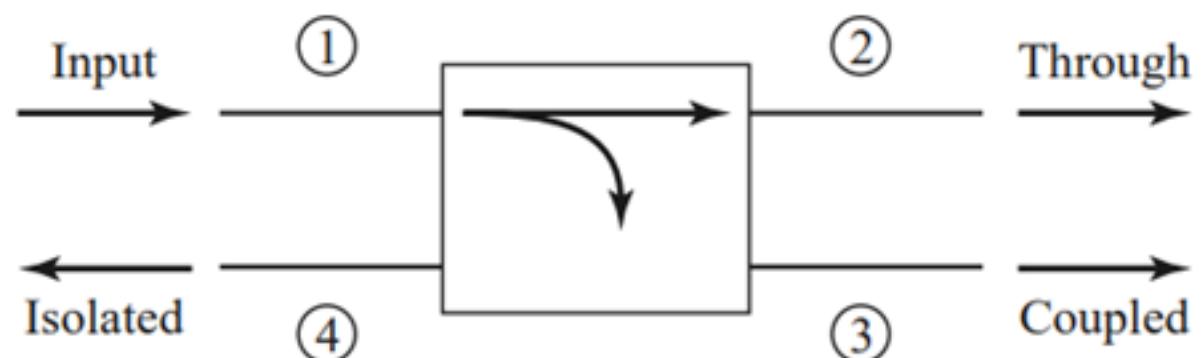
Coupler là

- Một mạch đặc biệt ở tần số cao
- Gồm 3 hoặc 4 cổng
- Phân chia hoặc kết hợp công suất

Directional coupler gồm 4 cổng nhằm chia một phần công suất qua cổng Coupling đồng thời không làm suy hao đường truyền chính.

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & 0 & S_{34} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & 0 \end{bmatrix}.$$

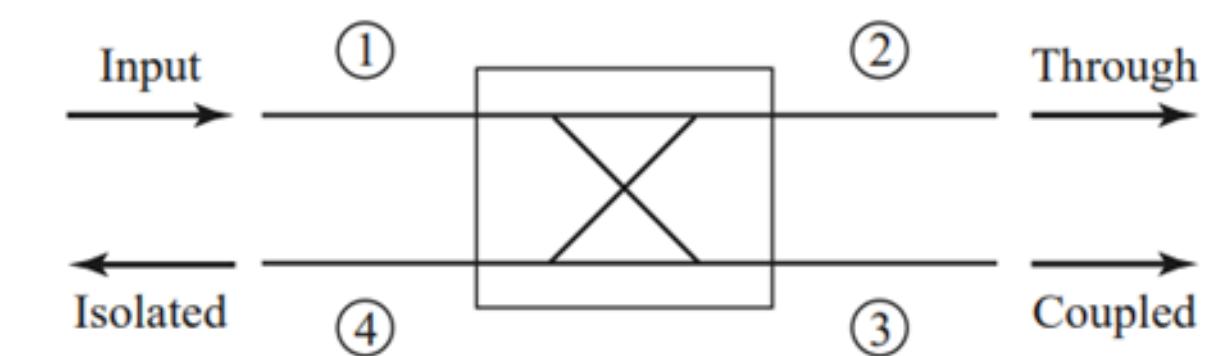
Với tính chất **thuận nghịch** và giả sử DC **không tổn hao** ta có thể phân chia làm 2 loại.



$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \beta & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & -\beta \\ \beta & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix}.$$

Bất đối xứng

Đối xứng



$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & j\beta & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & j\beta \\ j\beta & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & j\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix}.$$

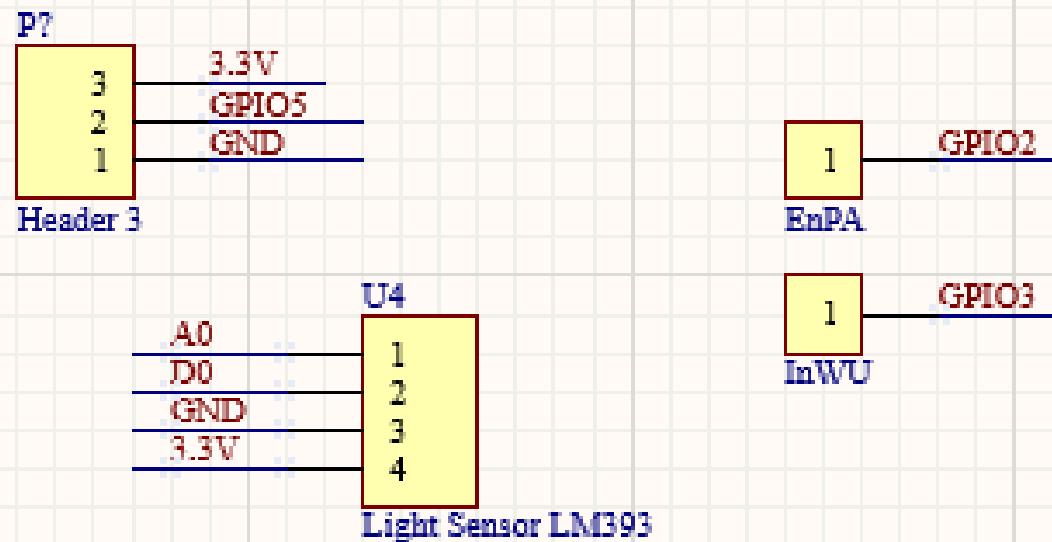
3. Sensor node BLE

- Sơ đồ nguyên lý
- Thiết kế PCB
- Đo kiểm
- Lưu đồ giải thuật

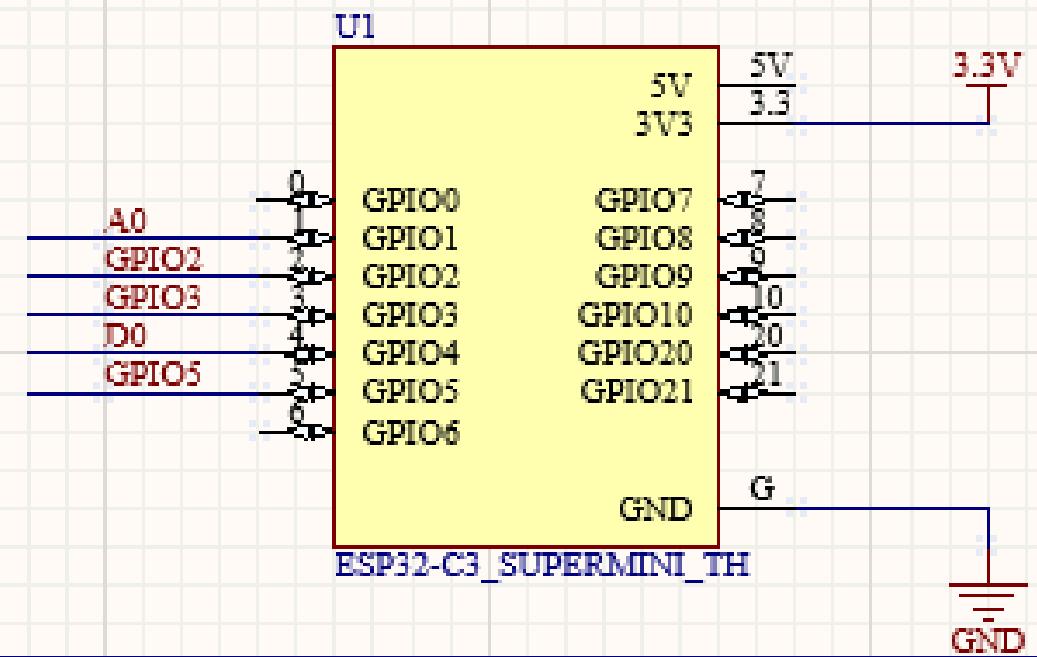
Long + Kiên
(4 mins)

SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ

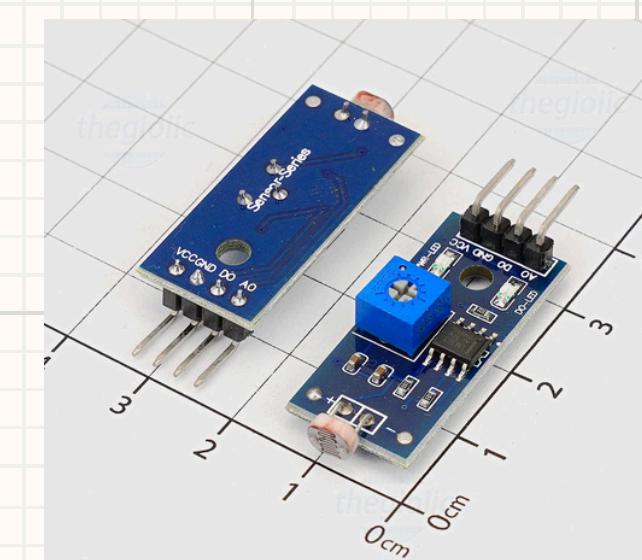
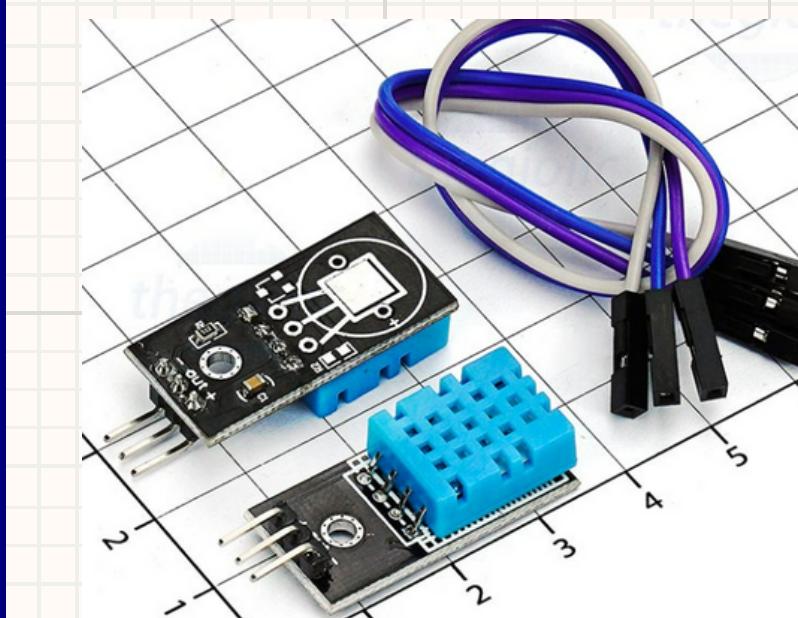
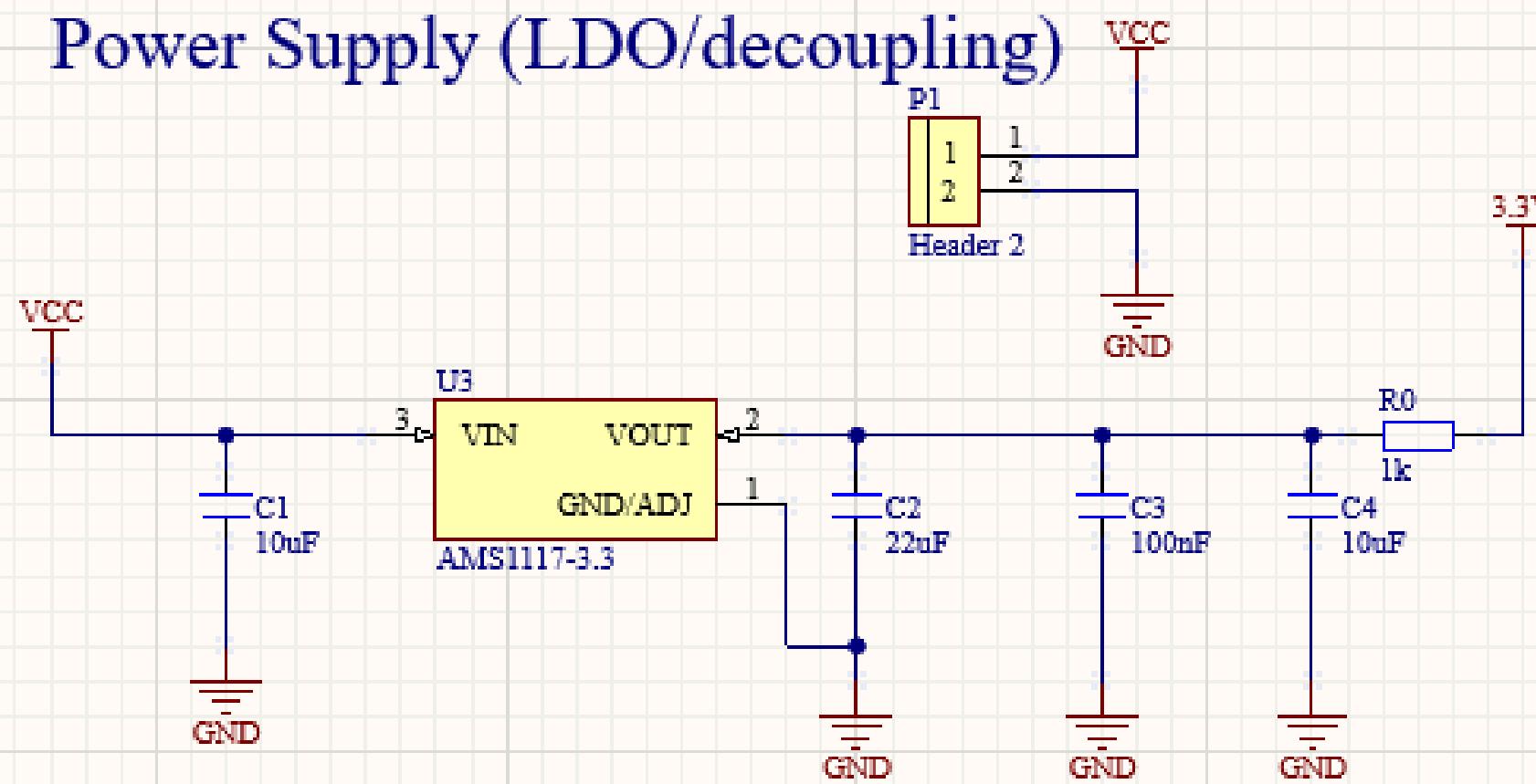
Sensor and Control



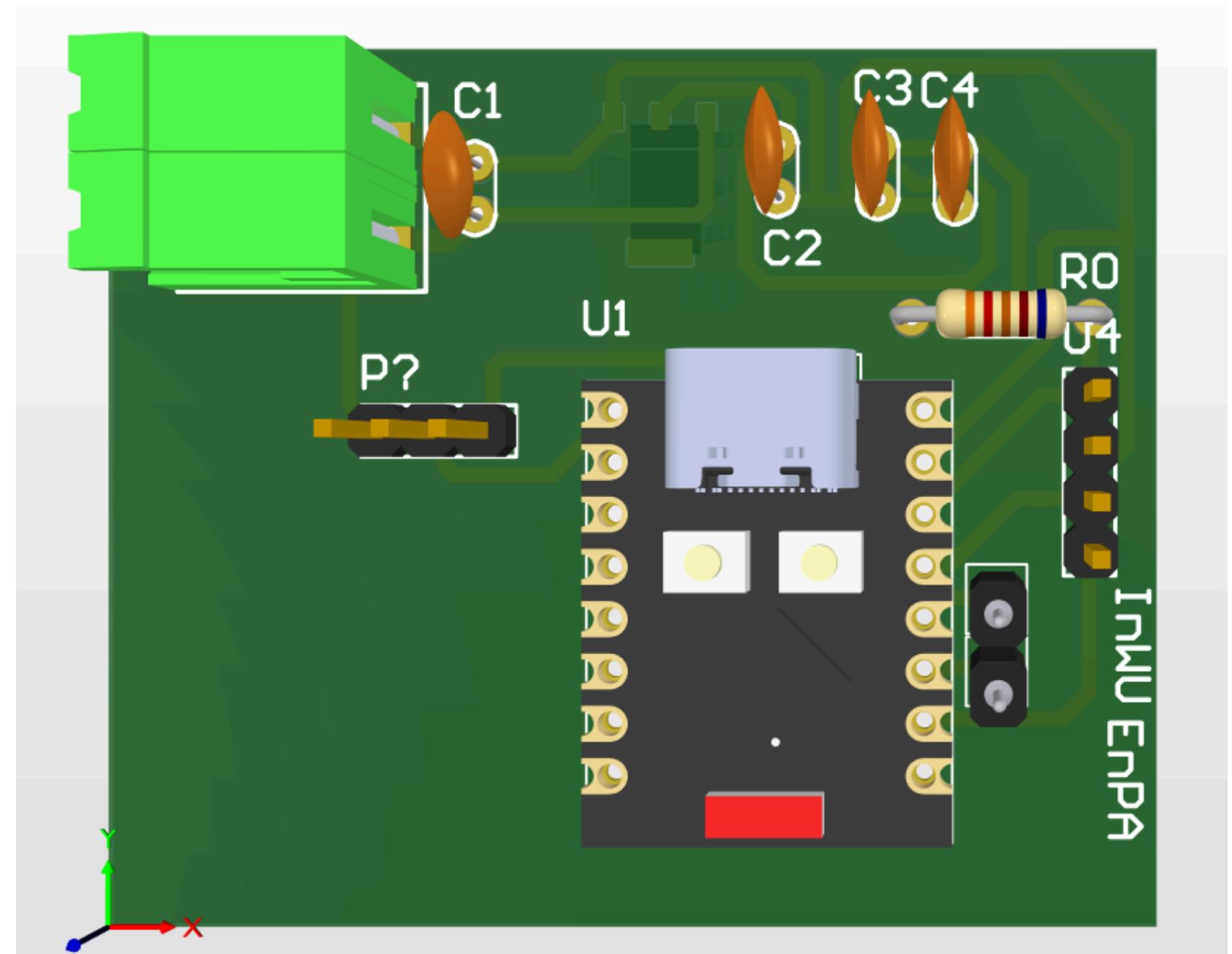
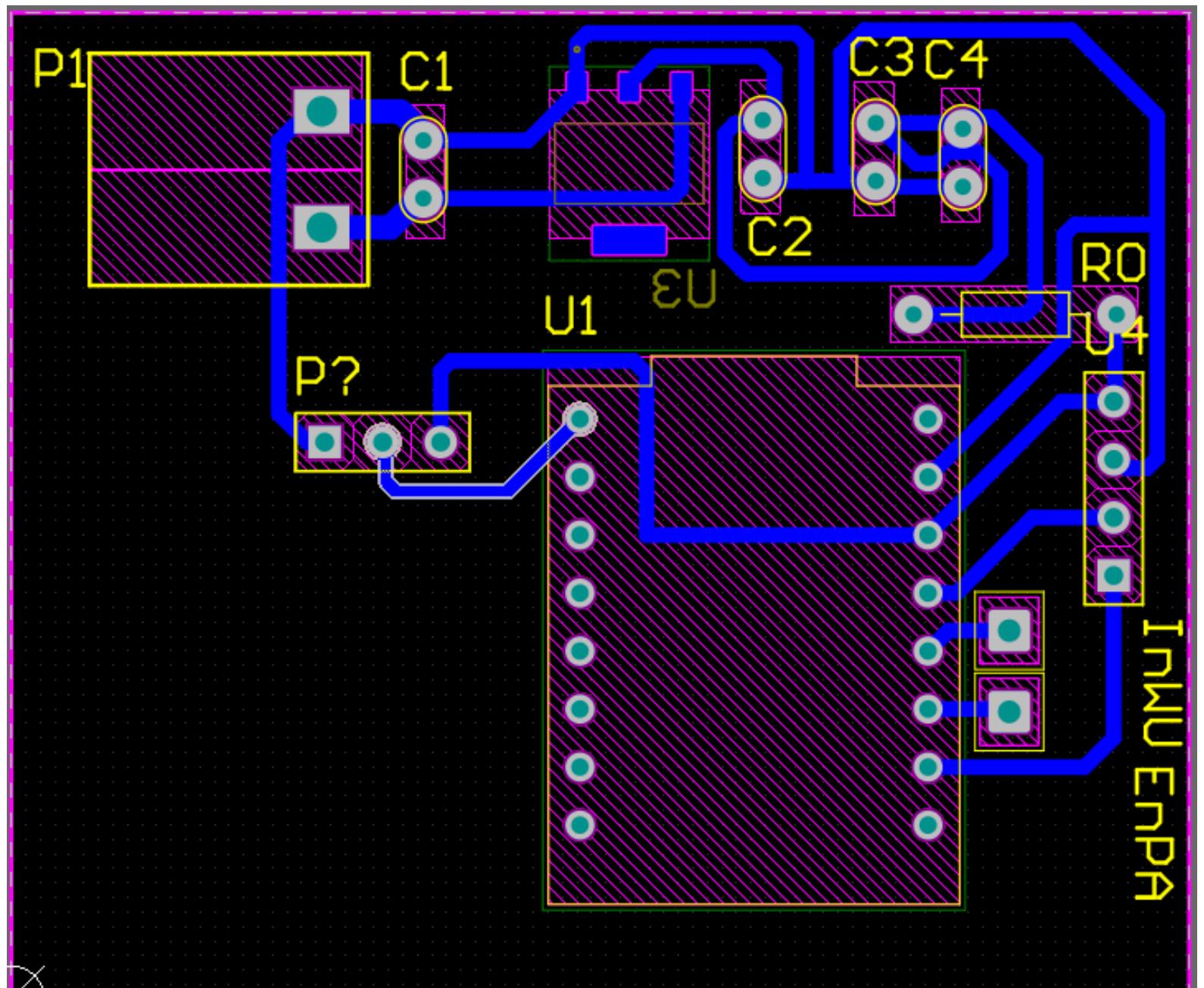
SoC BLE



Power Supply (LDO/decoupling)



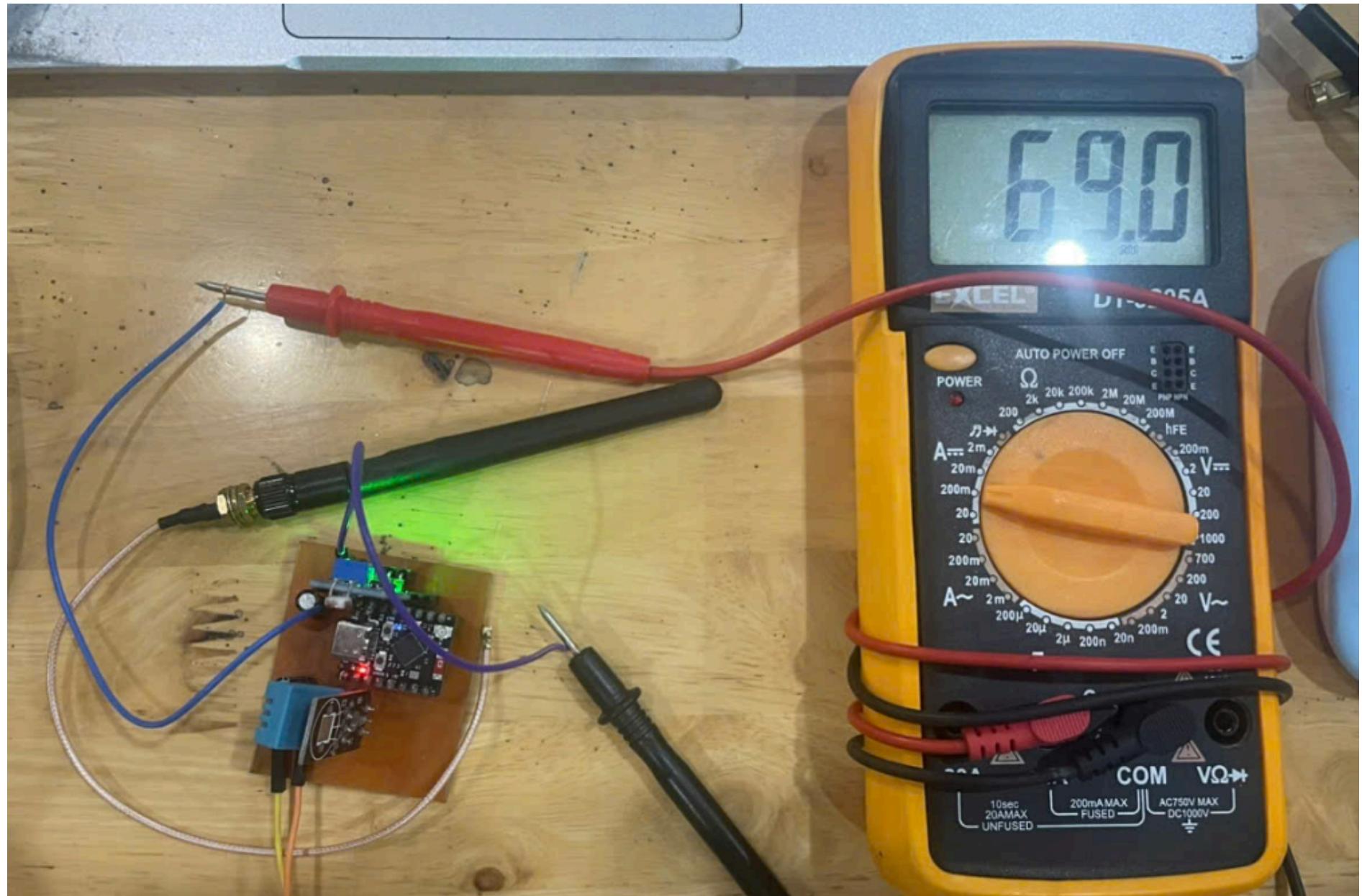
THIẾT KẾ PCB



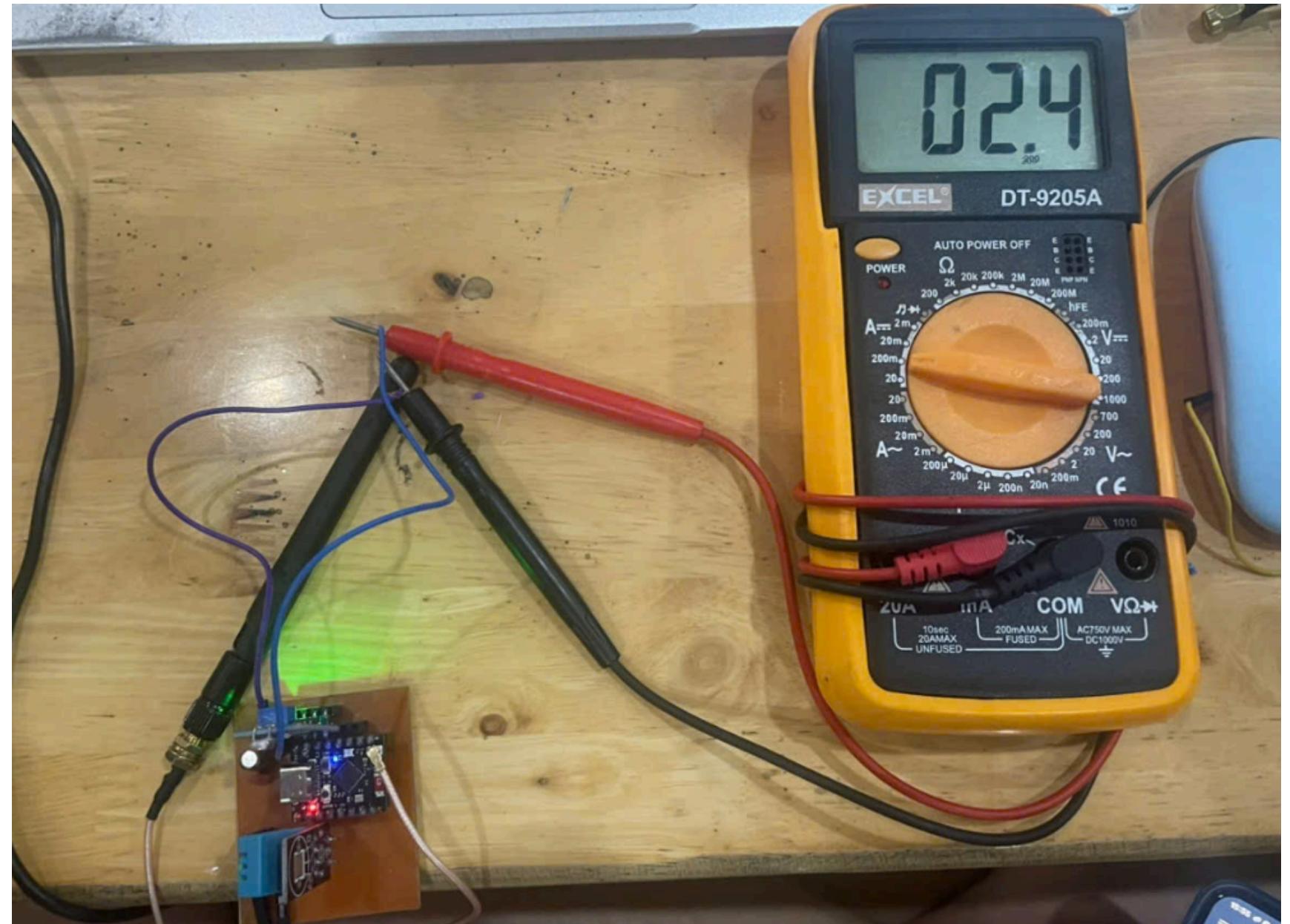
ĐO KIỂM

```
Temperature is 29
Humidity is 66
Status code is 0
Light is 1
I (18776) RTT: RTT = 346 us
I (18776) GATTS_DEMO: Confirm receive, status 0, attr_handle 42
I (18776) RTT: RTT = 346 us
I (18776) GATTS_DEMO: Confirm receive, status 0, attr_handle 45
I (18786) RTT: RTT = 346 us
I (18786) GATTS_DEMO: Confirm receive, status 0, attr_handle 48
--- Waiting for the device to reconnect.....
I (2474) WakeupLatency: Time = 364 us
I (2474) main_task: Returned from app_main()
Temperature is 29
Humidity is 66
Status code is 0
Light is 1
```

ĐO KIỂM



ACTIVE

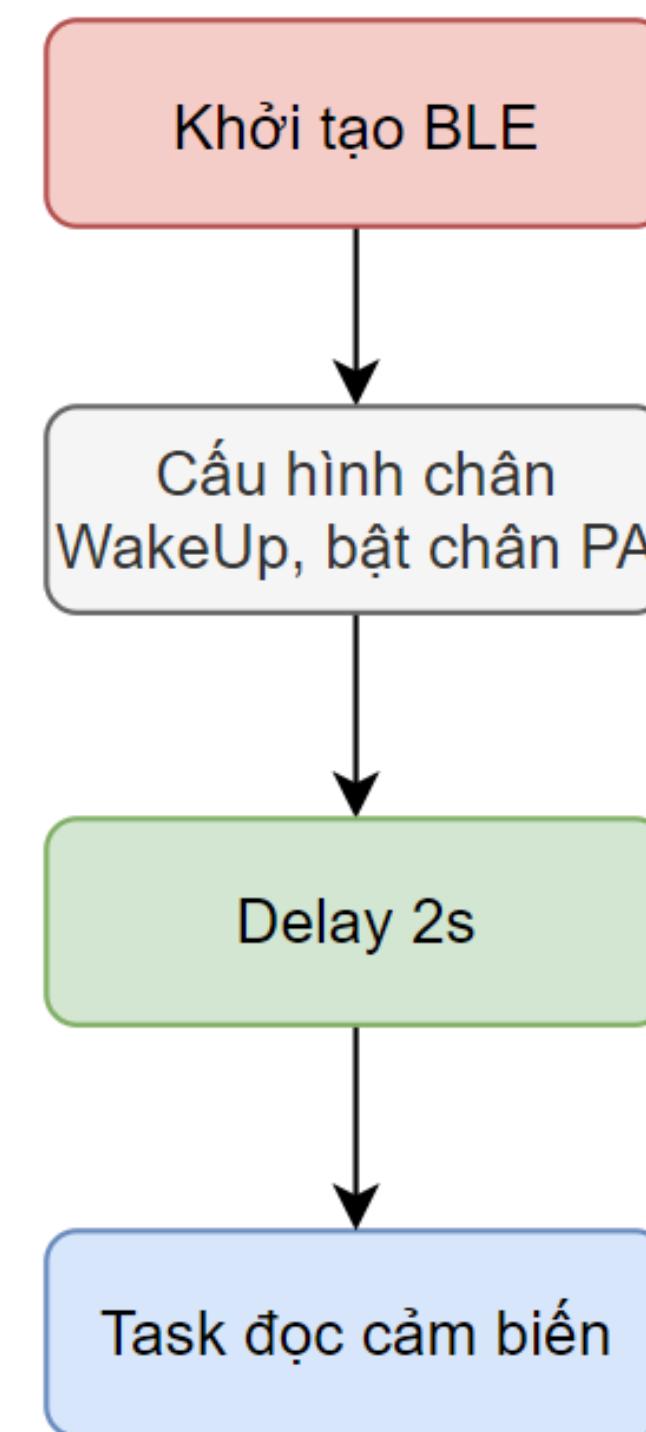


SLEEP

LƯU ĐỒ GIẢI THUẬT

Chương trình triển khai một BLE GATT Server trên ESP32, cung cấp 03 đặc tính đo môi trường (Temperature – Humidity – Light).

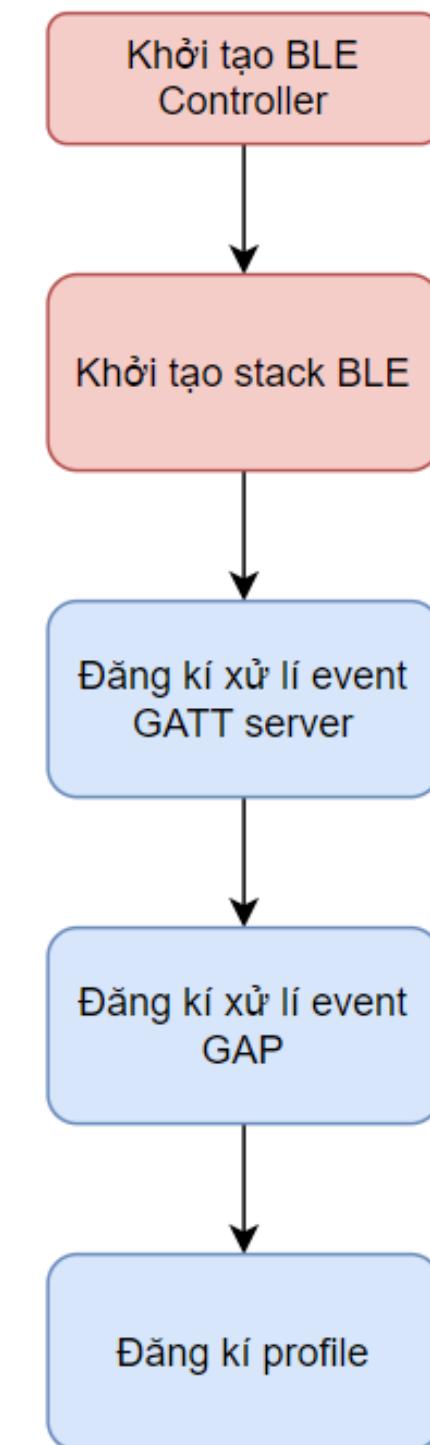
Giải thuật tổng quát:



LƯU ĐỒ GIẢI THUẬT

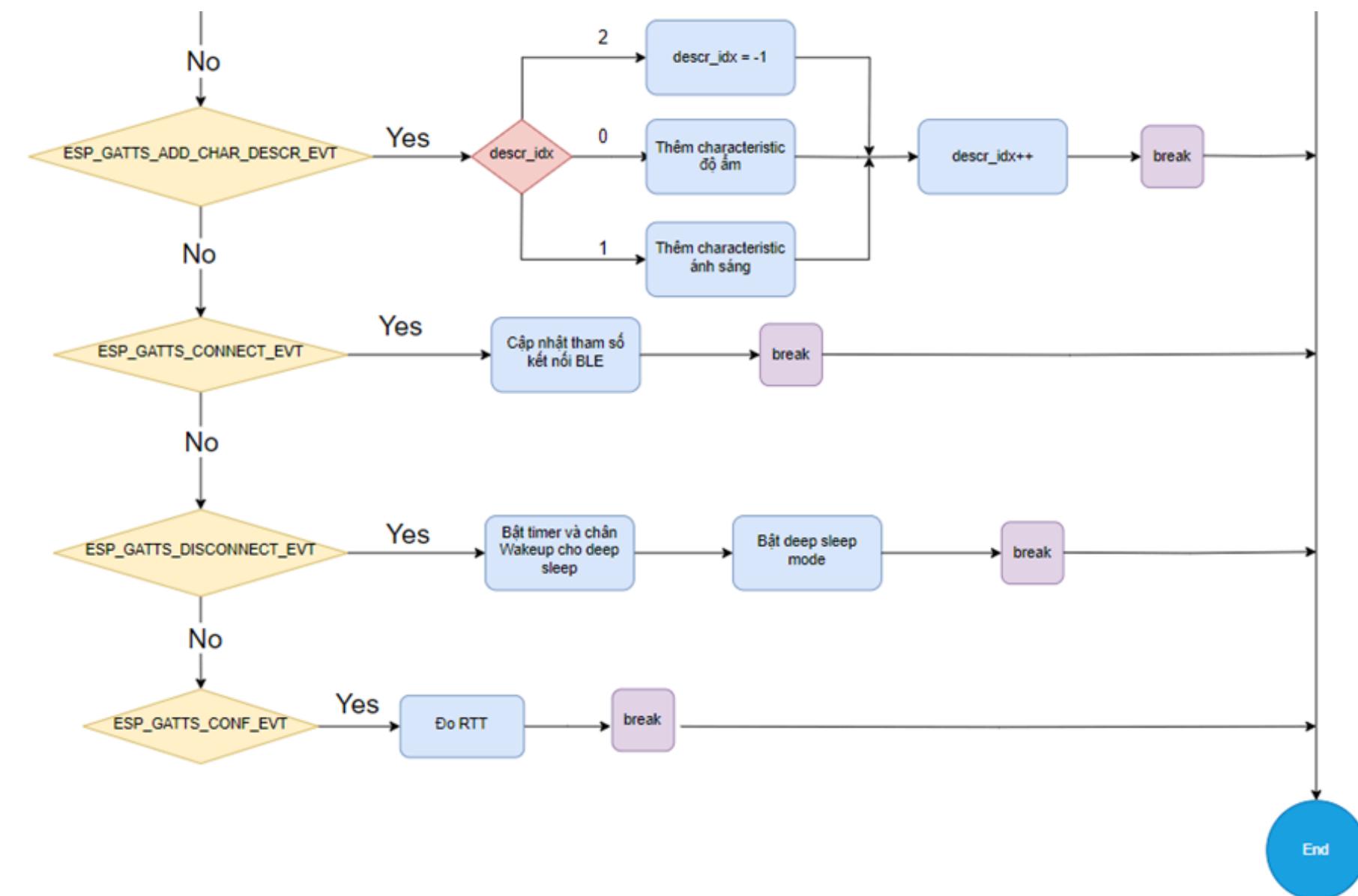
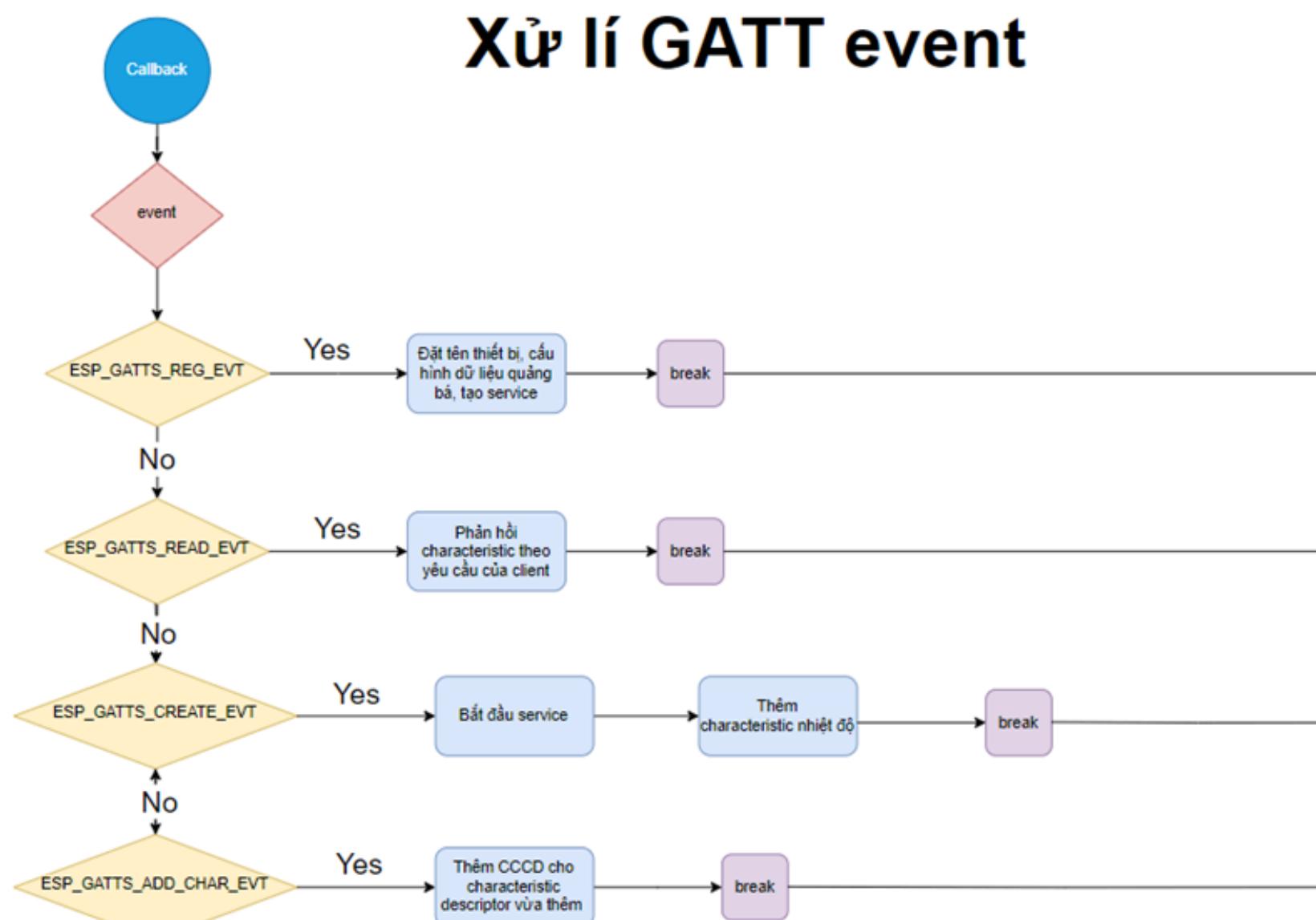
Module BLE được khởi tạo để chuẩn bị cho việc giao tiếp không dây, thiết lập stack BLE để xử lý thông tin.

Khởi tạo BLE



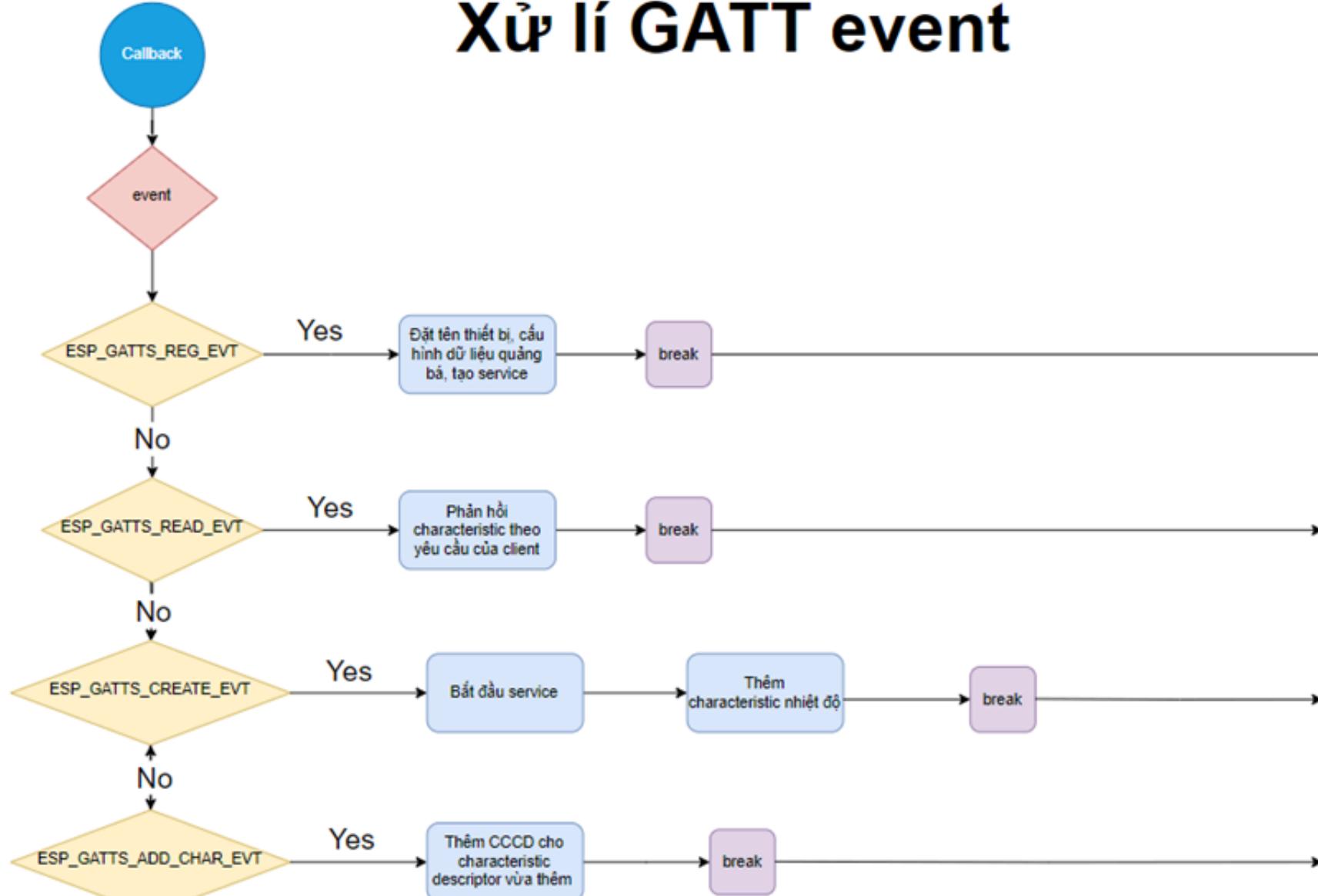
LƯU ĐỒ GIẢI THUẬT

Trong chương trình, mọi sự kiện (event) từ BLE stack đều được chuyển vào hàm callback để xử lý. Lưu đồ mô tả toàn bộ luồng hoạt động của callback khi nhận các sự kiện GATT.



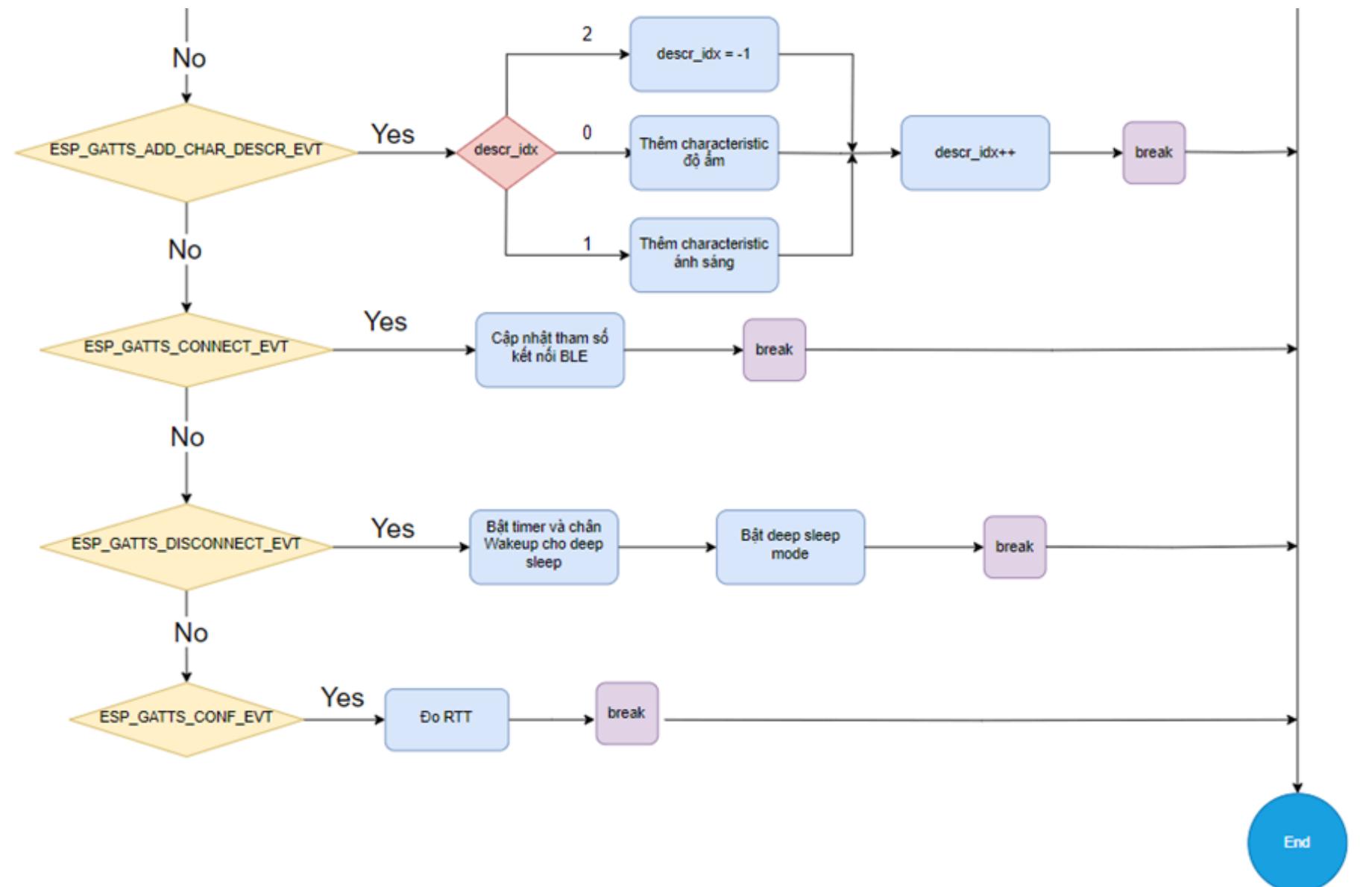
LƯU ĐỒ GIẢI THUẬT

Xử lí GATT event



- Sự kiện ESP_GATTS_REG_EVT xảy ra khi hệ thống thực hiện: đặt tên thiết bị BLE, cấu hình dữ liệu quảng bá (advertising data), khởi tạo service đầu tiên cho thiết bị.
- Sự kiện ESP_GATTS_READ_EVT: khi thiết bị BLE client gửi yêu cầu đọc dữ liệu, hệ thống phản hồi dữ liệu của characteristic tương ứng, đây là dữ liệu cảm biến khởi tạo ban đầu.
- Sự kiện ESP_GATTS_CREATE_EVT: khi service được tạo thành công, sau đó thêm characteristic đầu tiên vào service (ví dụ: characteristic nhiệt độ).
- Sự kiện ESP_GATTS_ADD_CHAR_EVT xảy ra khi một characteristic mới được thêm vào service, tiếp tục thêm descriptor CCCD (Client Characteristic Configuration Descriptor) cho characteristic vừa thêm.

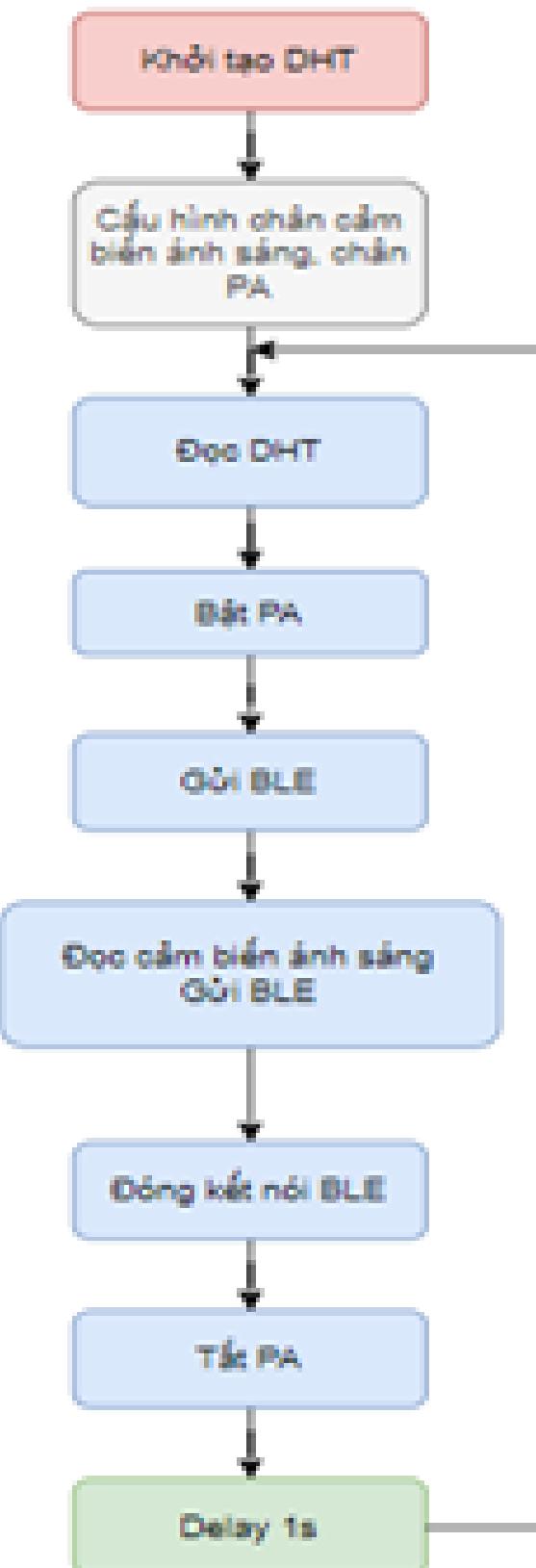
LƯU ĐỒ GIẢI THUẬT



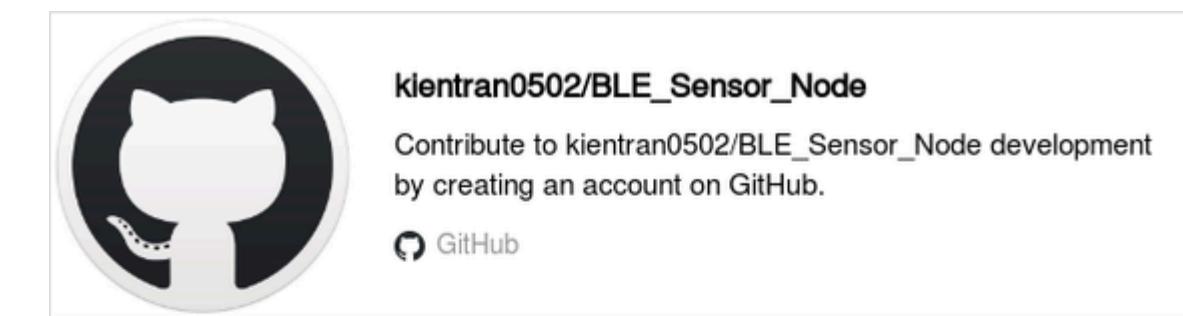
- Sự kiện `ESP_GATTS_ADD_CHAR_DESCR_EVT` khi một descriptor được khởi tạo xong, hệ thống kiểm tra biến `descr_idx` để thêm characteristic nào tiếp theo.
- Sự kiện `ESP_GATTS_CONNECT_EVT` khi client (điện thoại hoặc thiết bị BLE khác) kết nối tới server, hệ thống cập nhật tham số kết nối BLE (connection parameters).
- Sự kiện `ESP_GATTS_DISCONNECT_EVT` khi quá trình kết nối BLE bị ngắt, hệ thống bật timer và cấu hình chân Wakeup để chuẩn bị vào chế độ ngủ sâu (deep sleep).
- Sự kiện `ESP_GATTS_CONF_EVT` sự kiện báo rằng một Notify/Indicate (một thông tin của cảm biến) đã được gửi thành công. Hệ thống thực hiện đo RTT.

LƯU ĐỒ GIẢI THUẬT

Task đọc cảm biến



Khởi động cảm biến nhiệt độ, độ ẩm DHT, cấu hình chân cảm biến ánh sáng, , sau đó đọc cảm biến, bật bộ PA, gửi BLE và đóng kết nối, tắt bộ PA.



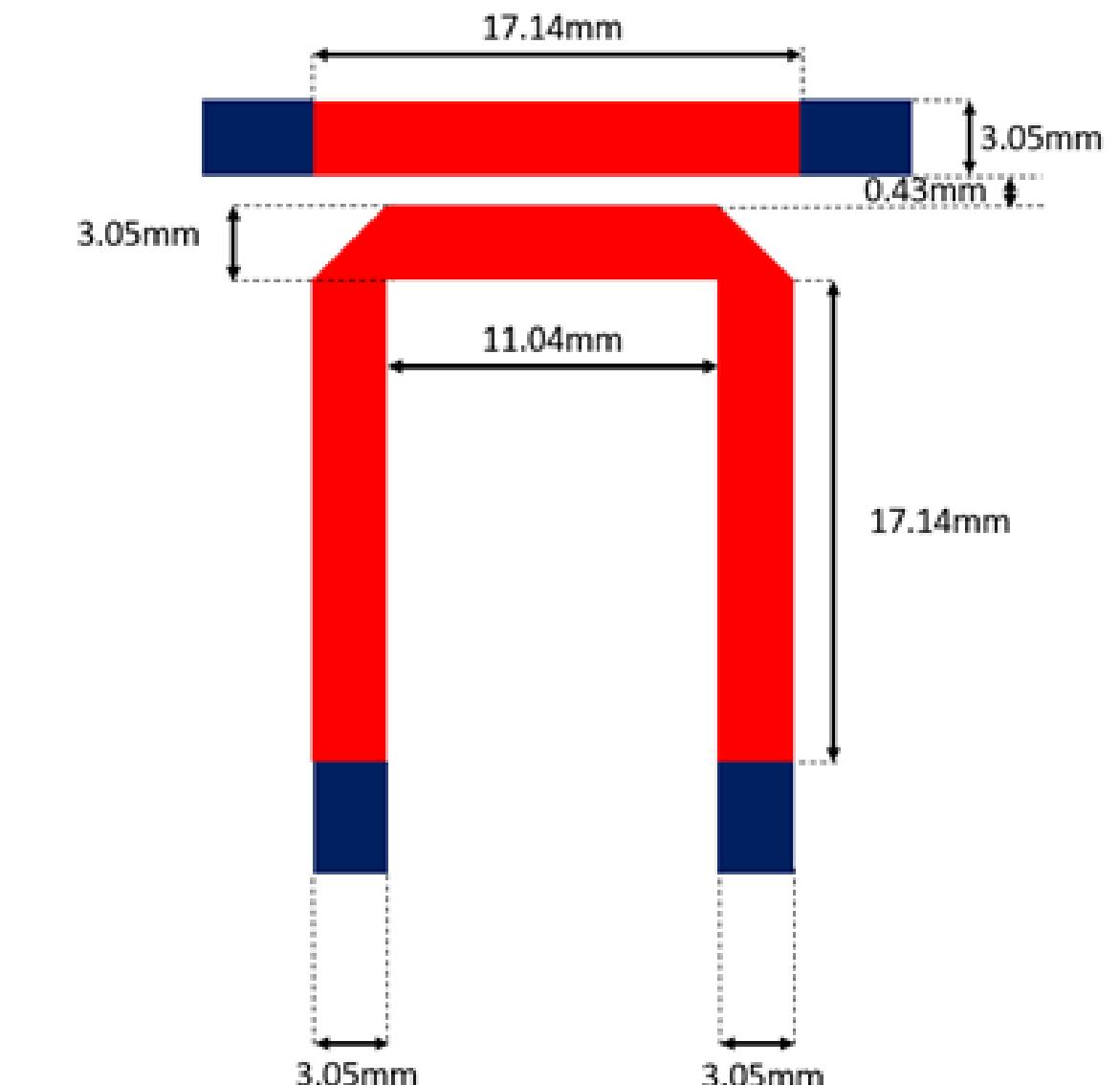
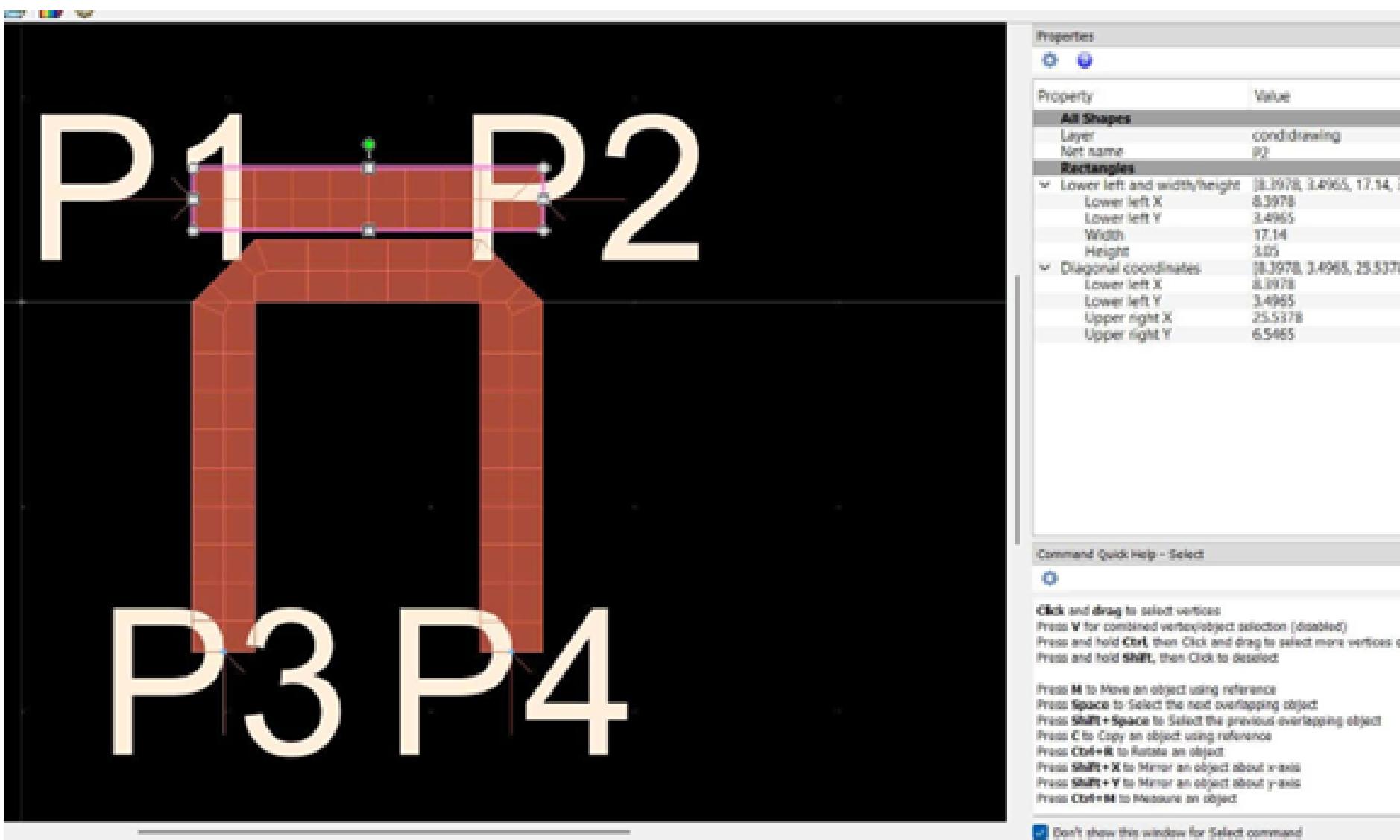
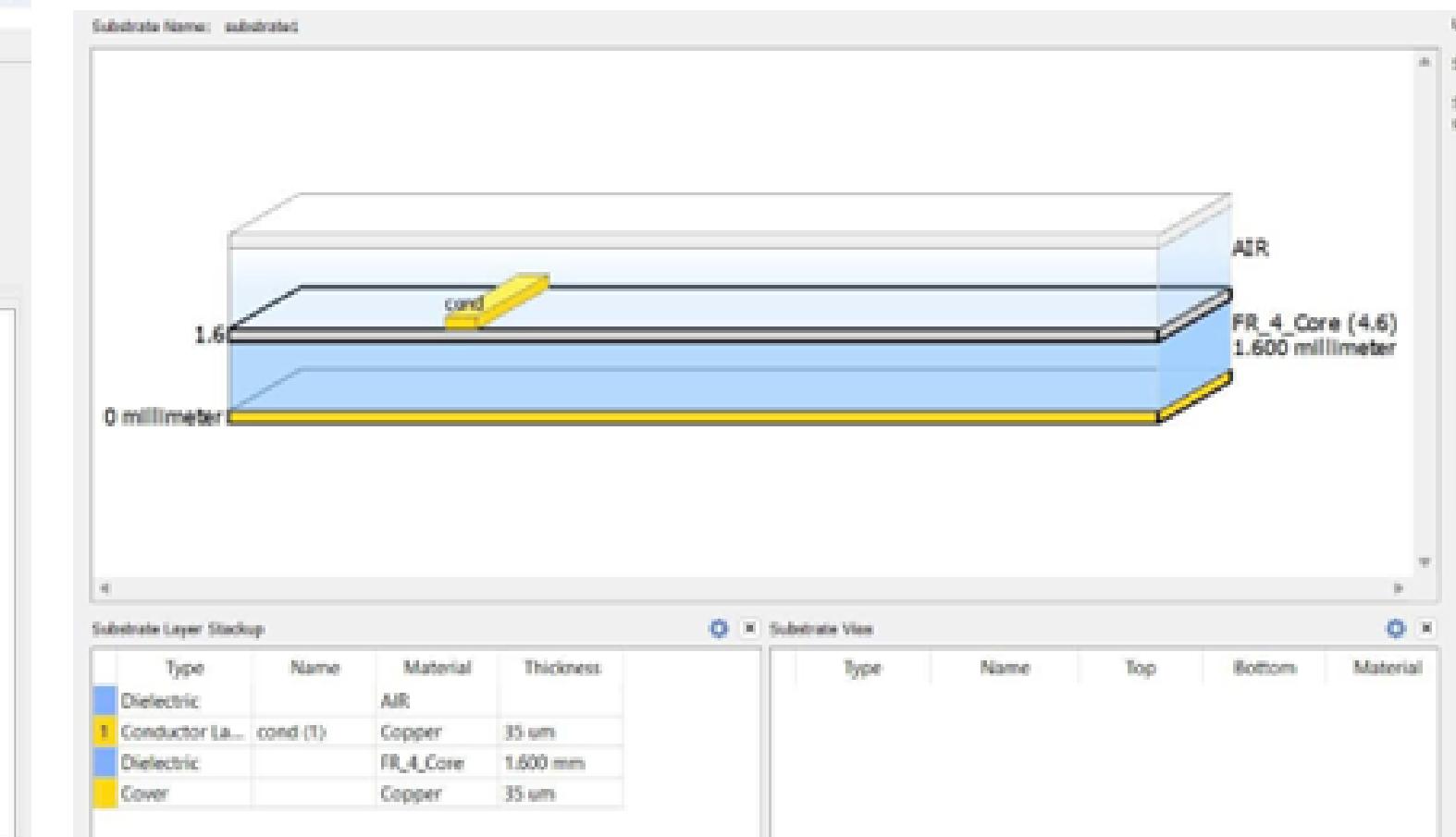
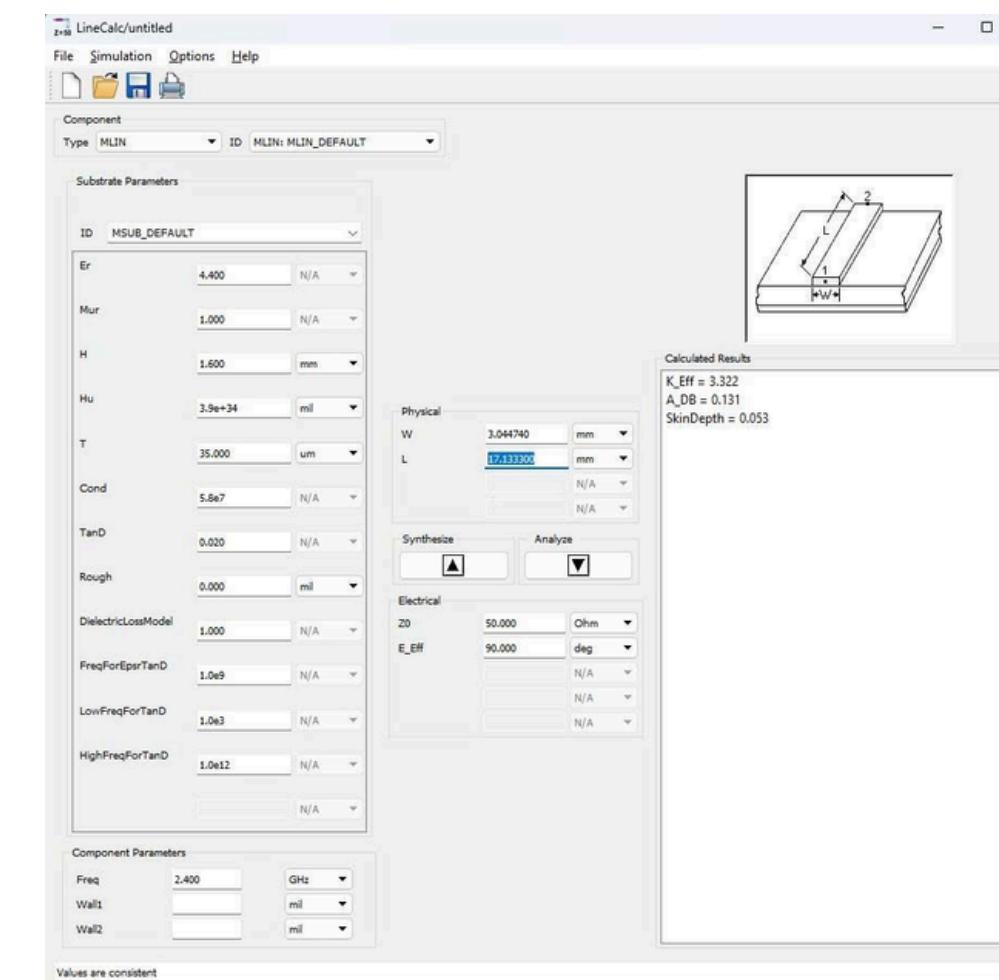
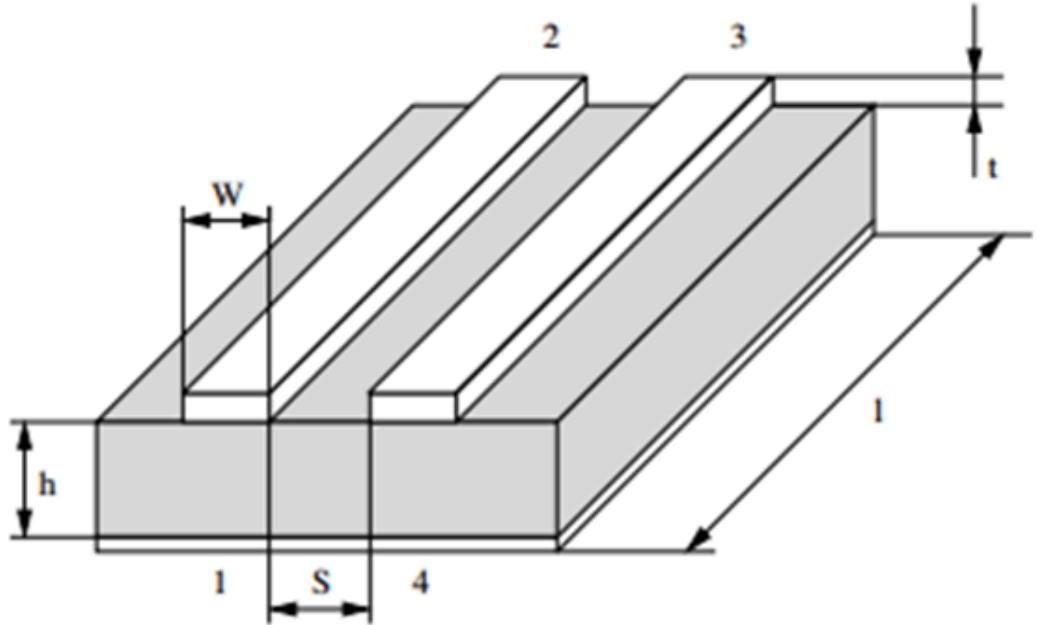
Link Github

4. Directional Coupler

- Mô phỏng ADS
- Chế tạo PCB
- Đo kiểm thực tế

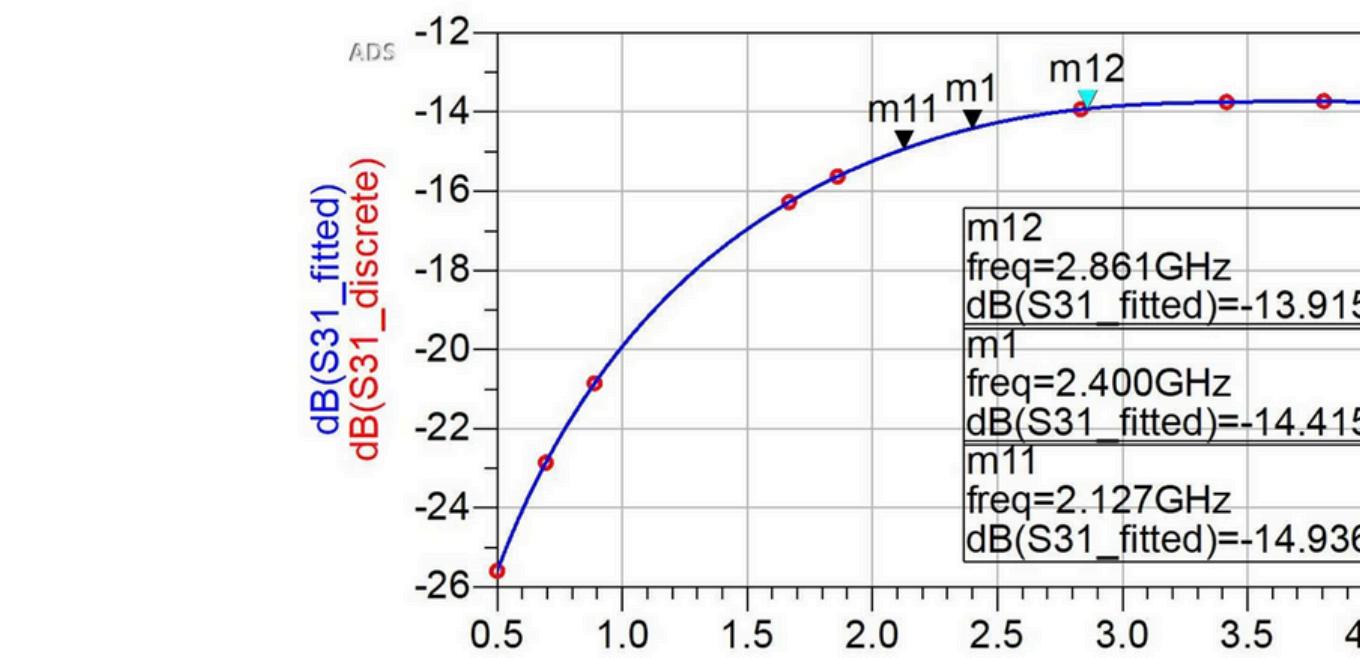
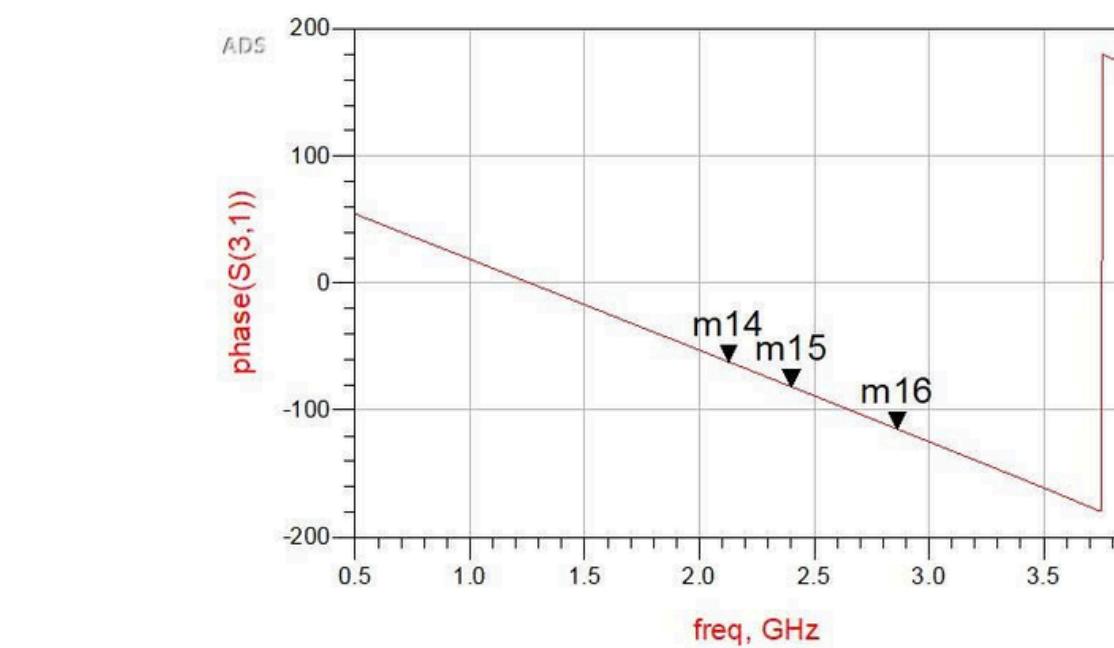
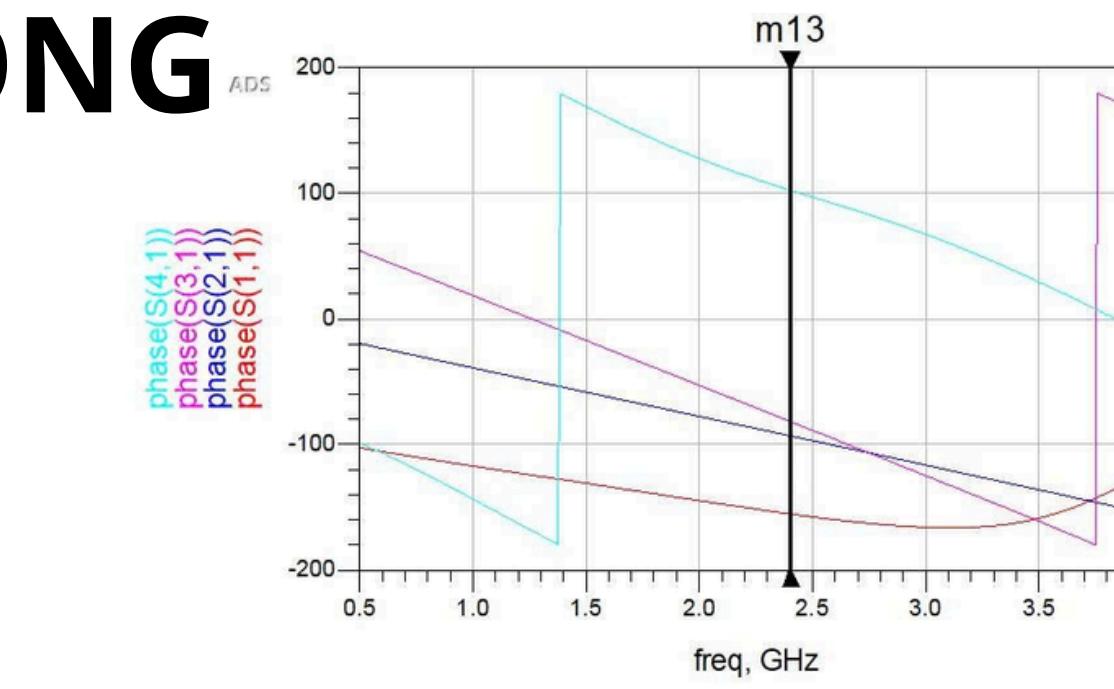
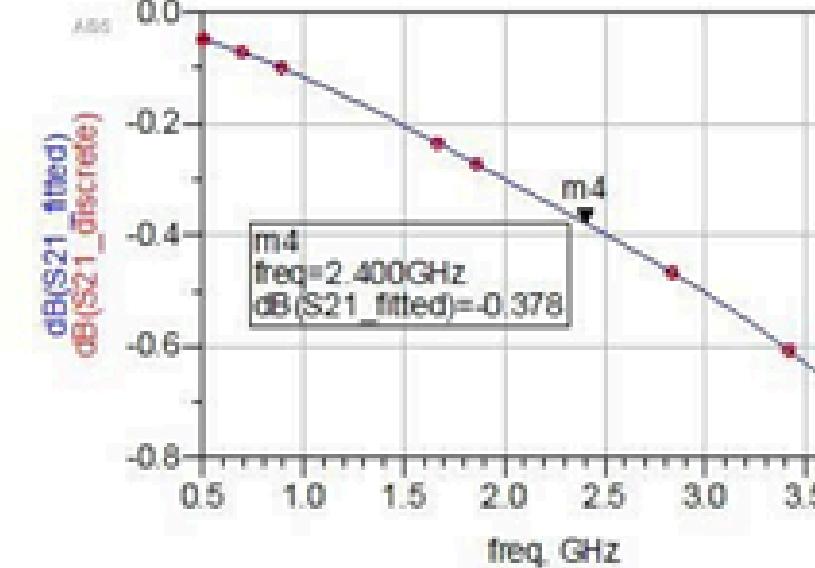
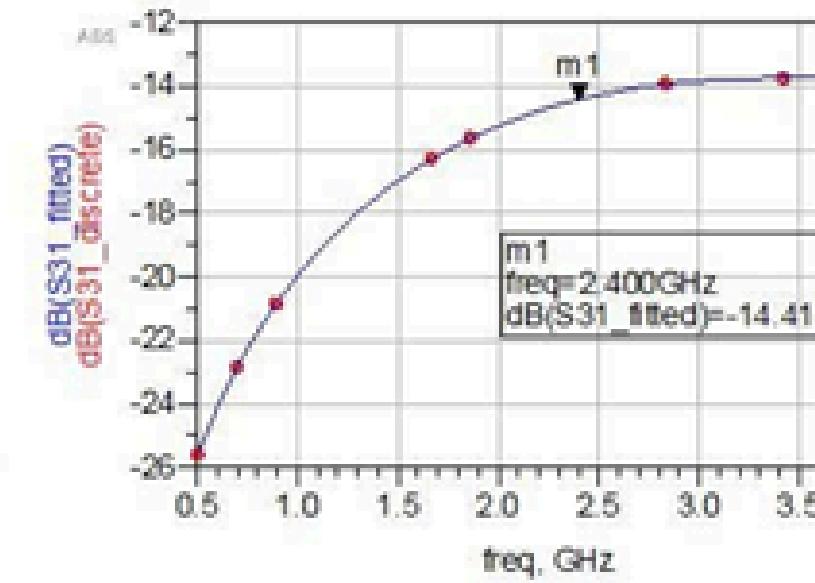
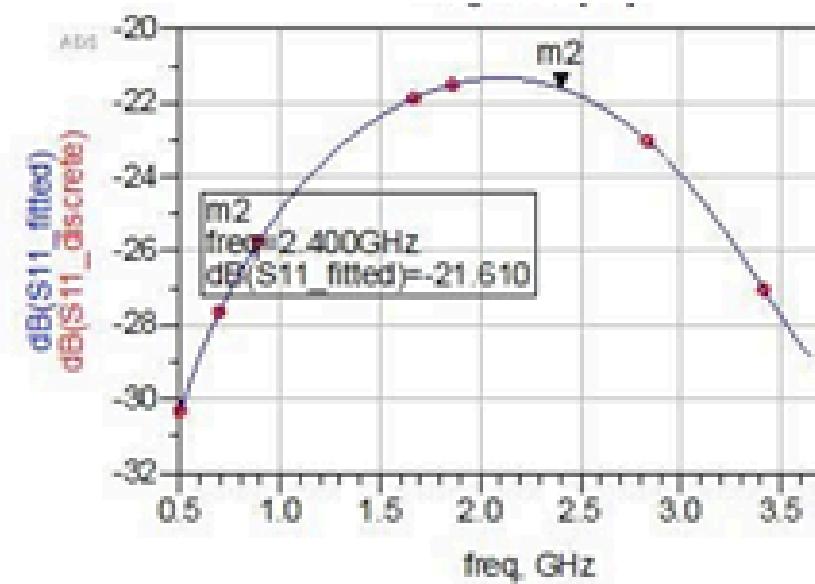
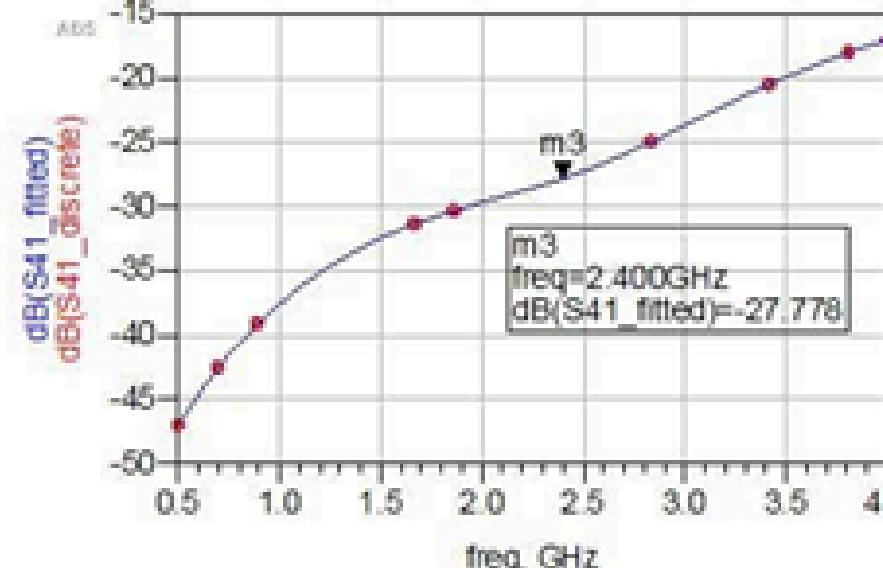
Khang
(2 mins)

MÔ PHỎNG ADS



KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

S11 (Reflection)	-21.61 dB
S21 (Insertion loss)	-0.378 dB
S31 (Coupling)	-14.415 dB
S41 (Isolation)	-26.552 dB
Bandwidth	734 MHz
Phase (Through)	-93.116
Phase (Coupling)	-81.616



```

m13
freq=2.400GHz
phase(S(1,1))=-155.270
phase(S(2,1))=-93.116
phase(S(3,1))=-81.616
phase(S(4,1))=102.398

```

```

m14
freq=2.127GHz
phase(S(3,1))=-62.024

m15
freq=2.400GHz
phase(S(3,1))=-81.616

m16
freq=2.861GHz
phase(S(3,1))=-114.794

```

```

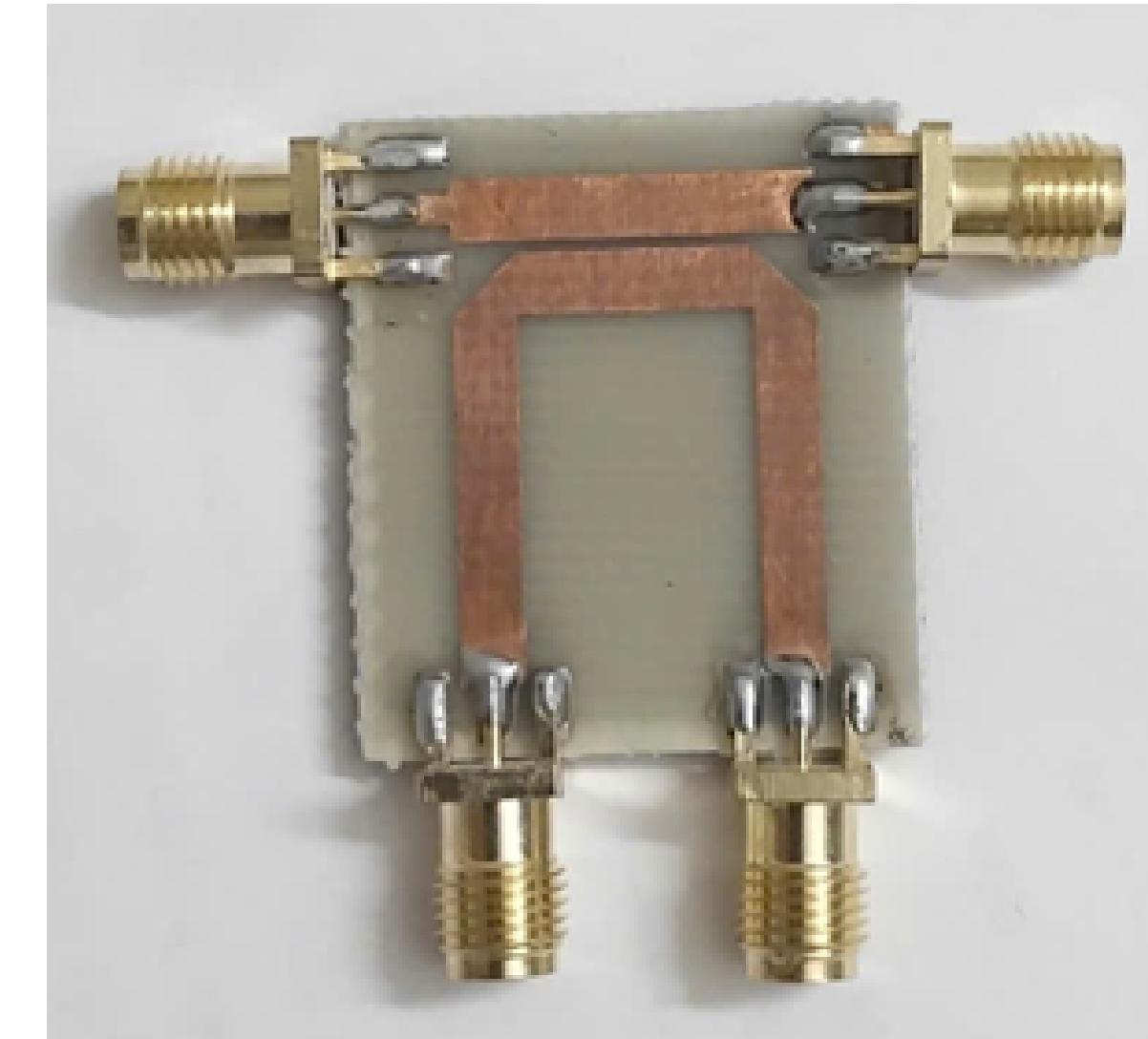
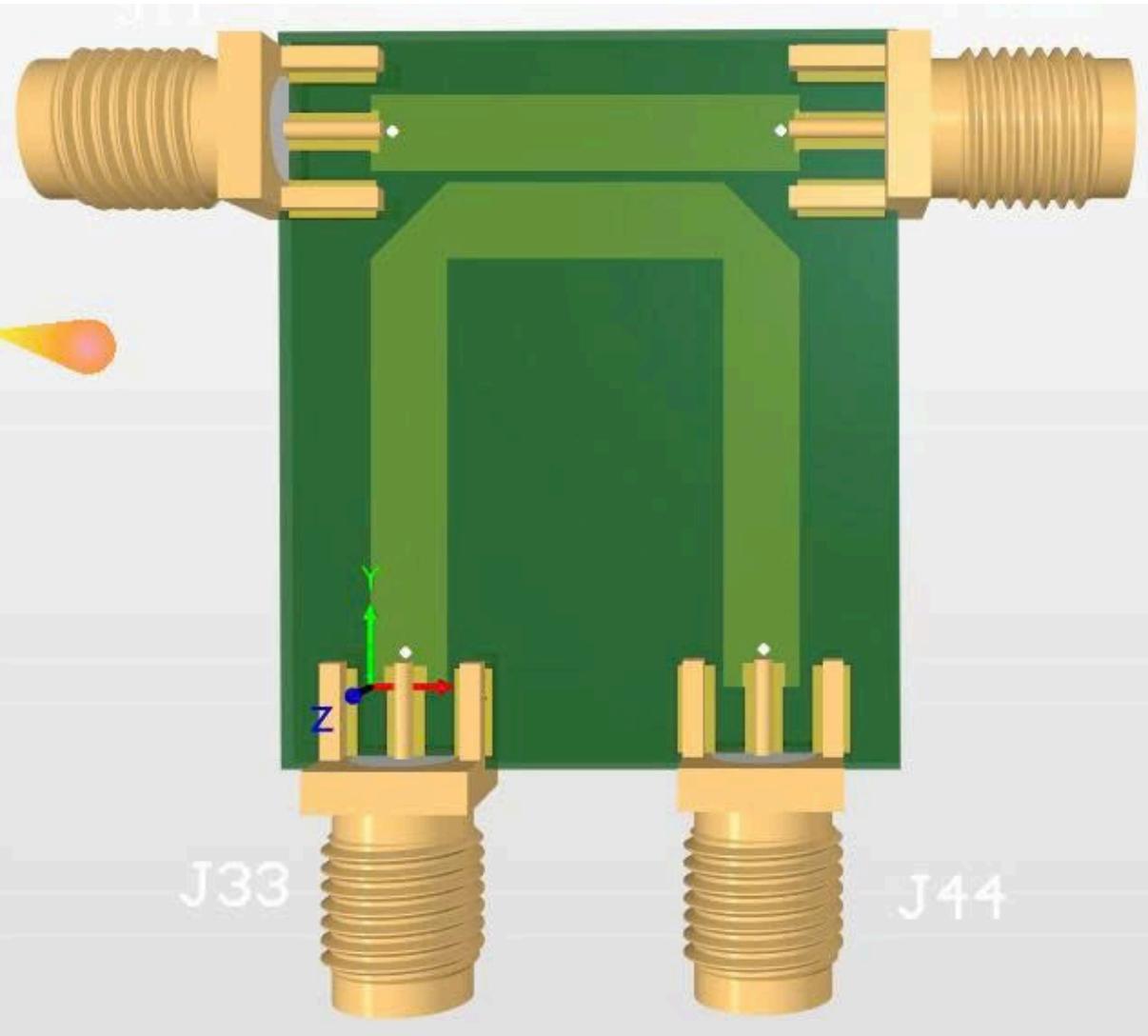
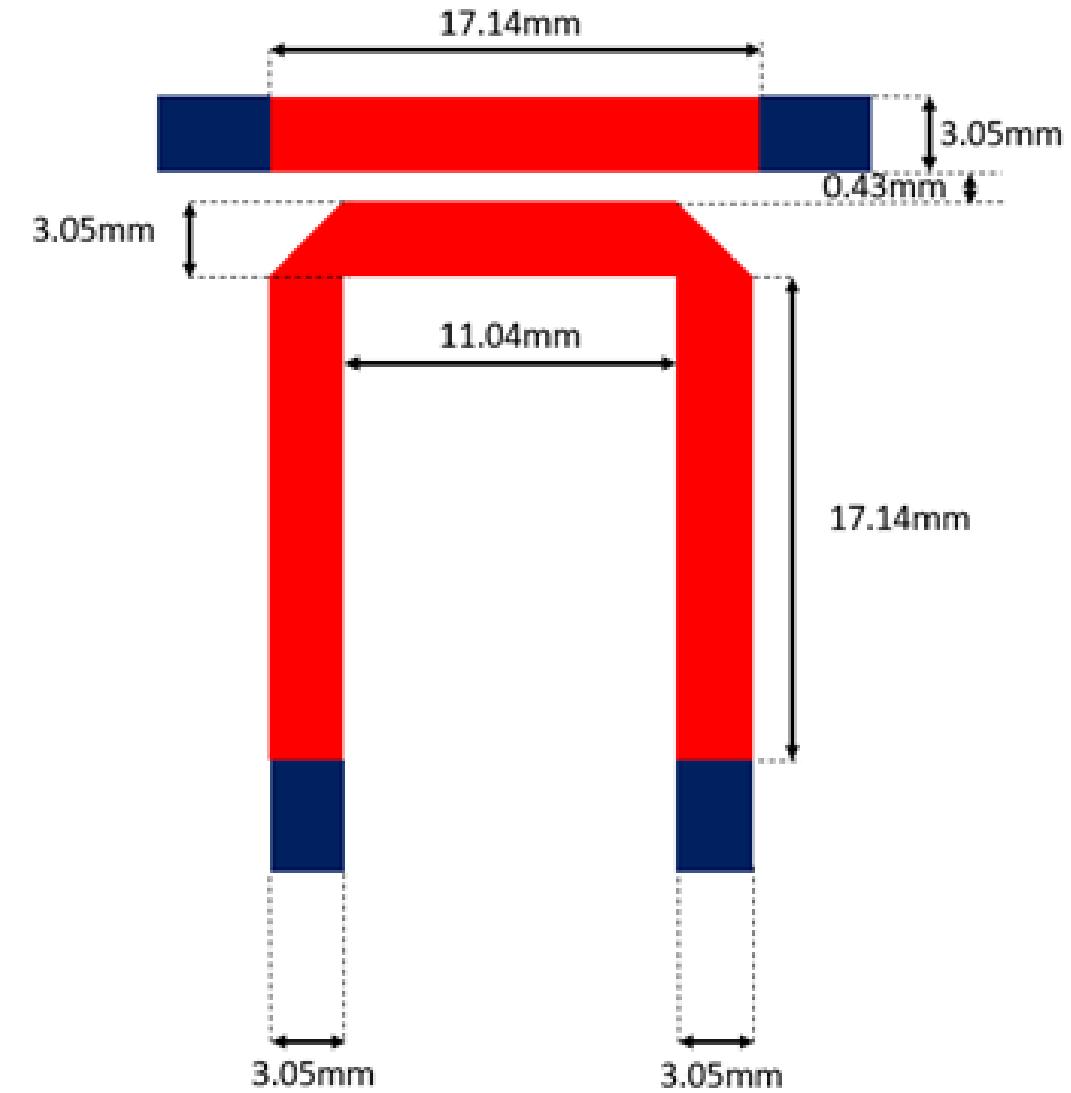
m12
freq=2.861GHz
dB(S31_fitted)=-13.915

m1
freq=2.400GHz
dB(S31_fitted)=-14.415

m11
freq=2.127GHz
dB(S31_fitted)=-14.936

```

CHẾ TẠO PCB



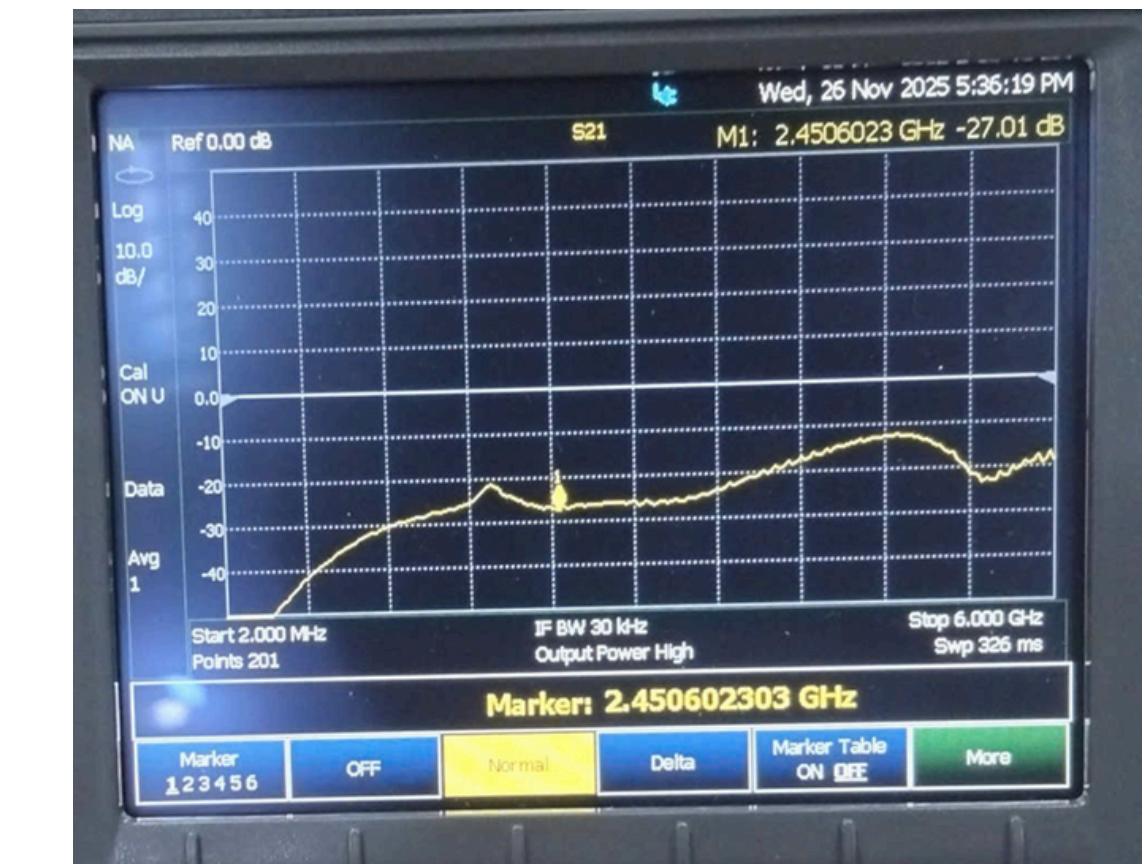
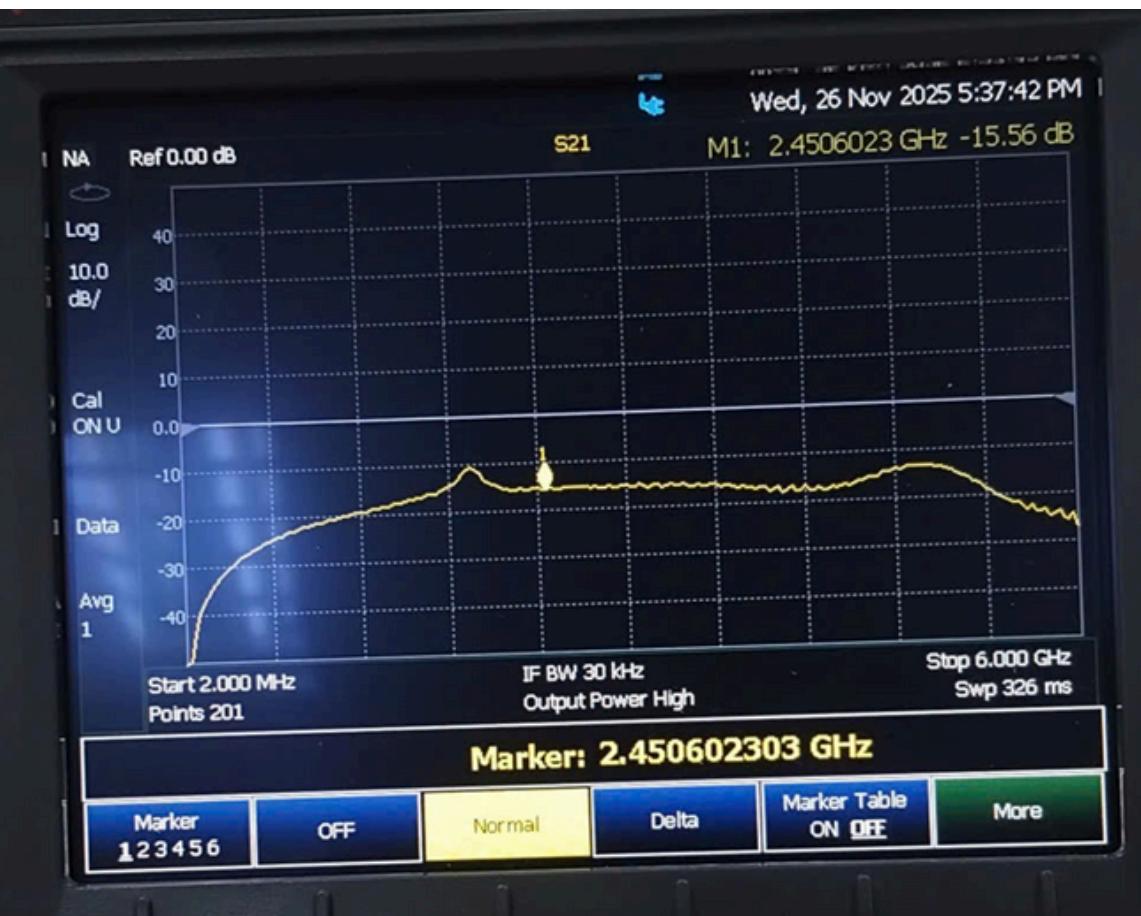
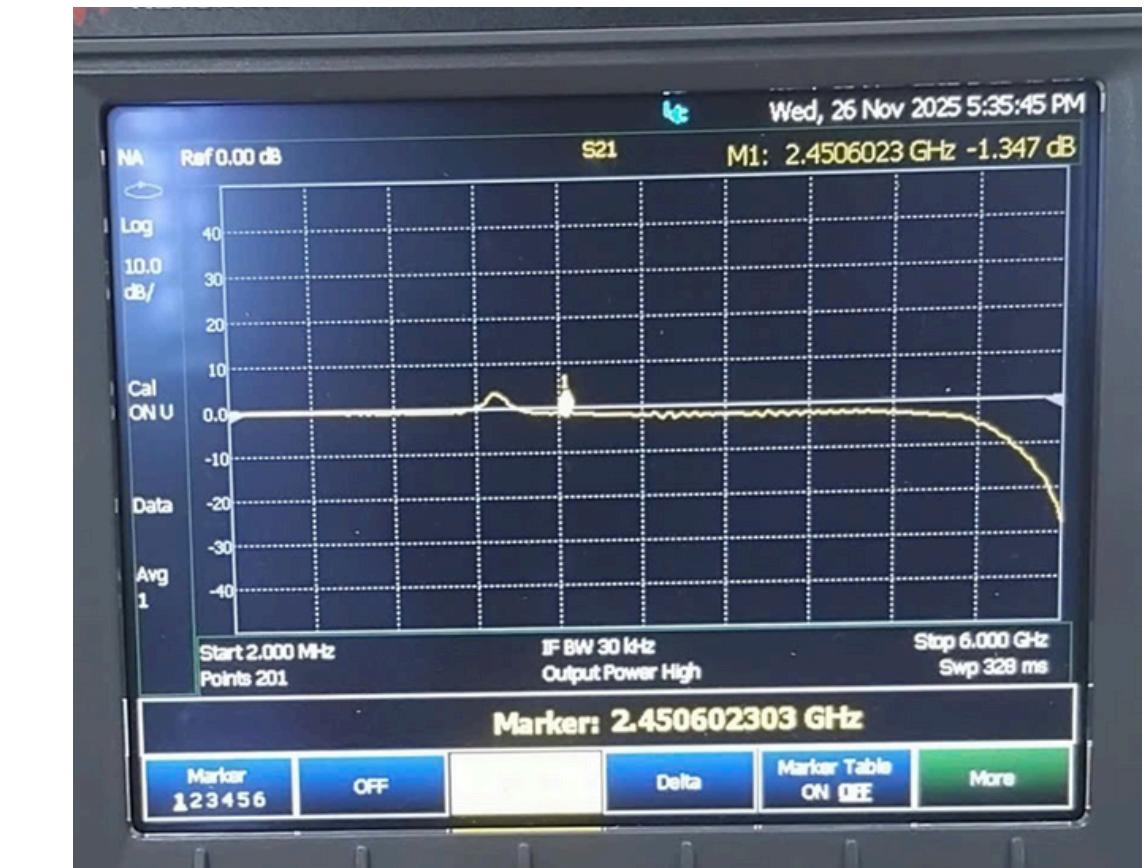
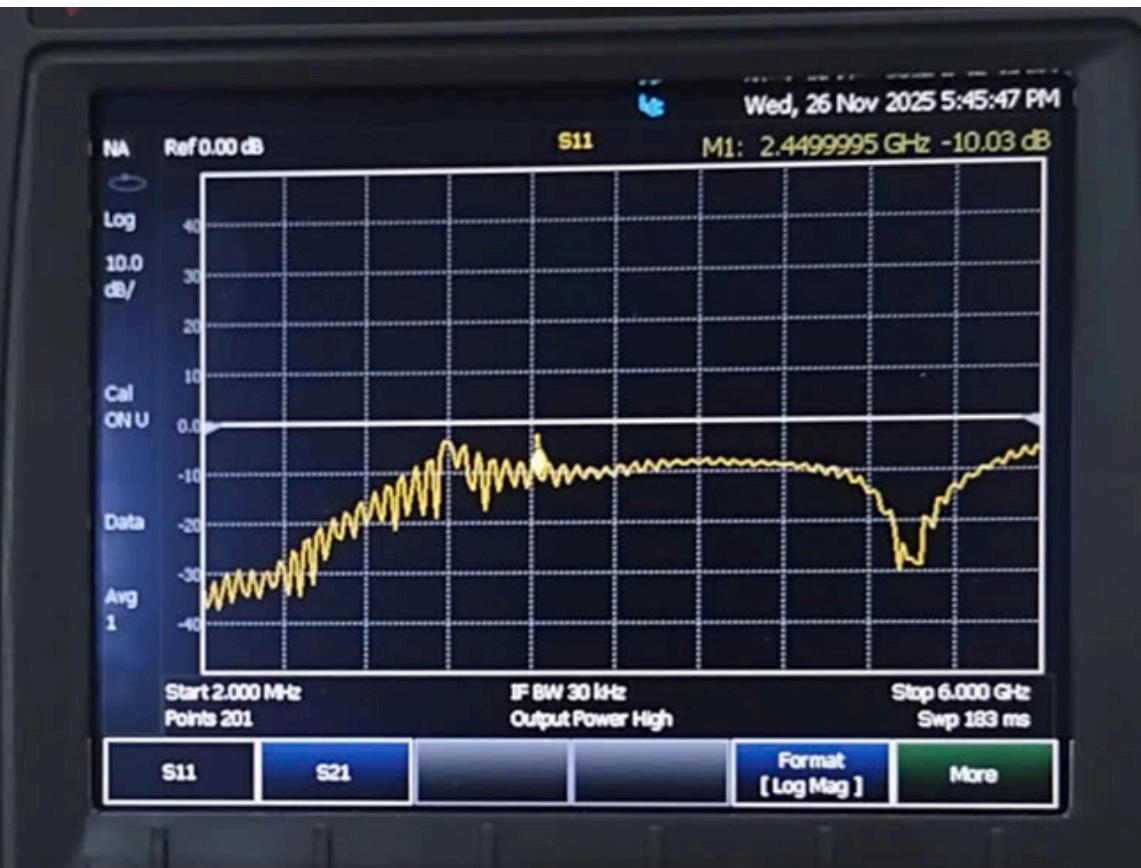
Thông số chi tiết

Layout Altium

Mạch thực tế

ĐO KIỂM THỰC TẾ

S11 (Reflection)	-10.03 dB
S21 (Insertion loss)	-1.347 dB
S31 (Coupling)	-15.56 dB
S41 (Isolation)	-27.01 dB



5. KẾT LUẬN VÀ ĐÁNH GIÁ

- Kết quả đạt được
- Những điểm hạn chế
- Hướng phát triển

TBD

(1 min)

VỀ SOC BLE

GATT Server chuẩn Environmental Sensing Service (0x181A).

Gửi 3 giá trị: nhiệt độ, độ ẩm, ánh sáng dưới định dạng IEEE-11073 FLOAT 4 byte → hiển thị đúng đơn vị °C, %RH.

Deep sleep tiêu thụ chỉ 2.9mA, tiết kiệm năng lượng tối đa.

VỀ DIRECTIONAL COUPLER

Mô phỏng Directional Coupler hoạt động đúng với việc cho tín hiệu đi qua đảm bảo 91.7% ở through port, coupling giá trị -14.5dB. Hệ số phản xạ và cách ly tốt.

Băng thông đủ rộng cho tín hiệu Bluetooth đồng thời đảm bảo chênh lệch số hệ coupling là 0.5dB.. Tùy vào ứng dụng có thể lựa chọn băng thông lớn hơn nhưng đánh đổi lại là độ chính xác.

Thiết kế PCB trên chất nền FR4, kết quả đo kiểm cho thấy nhưng vẫn còn tổn hao nhiều qua cổng through và phản xạ lớn ở cồng vào.

6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

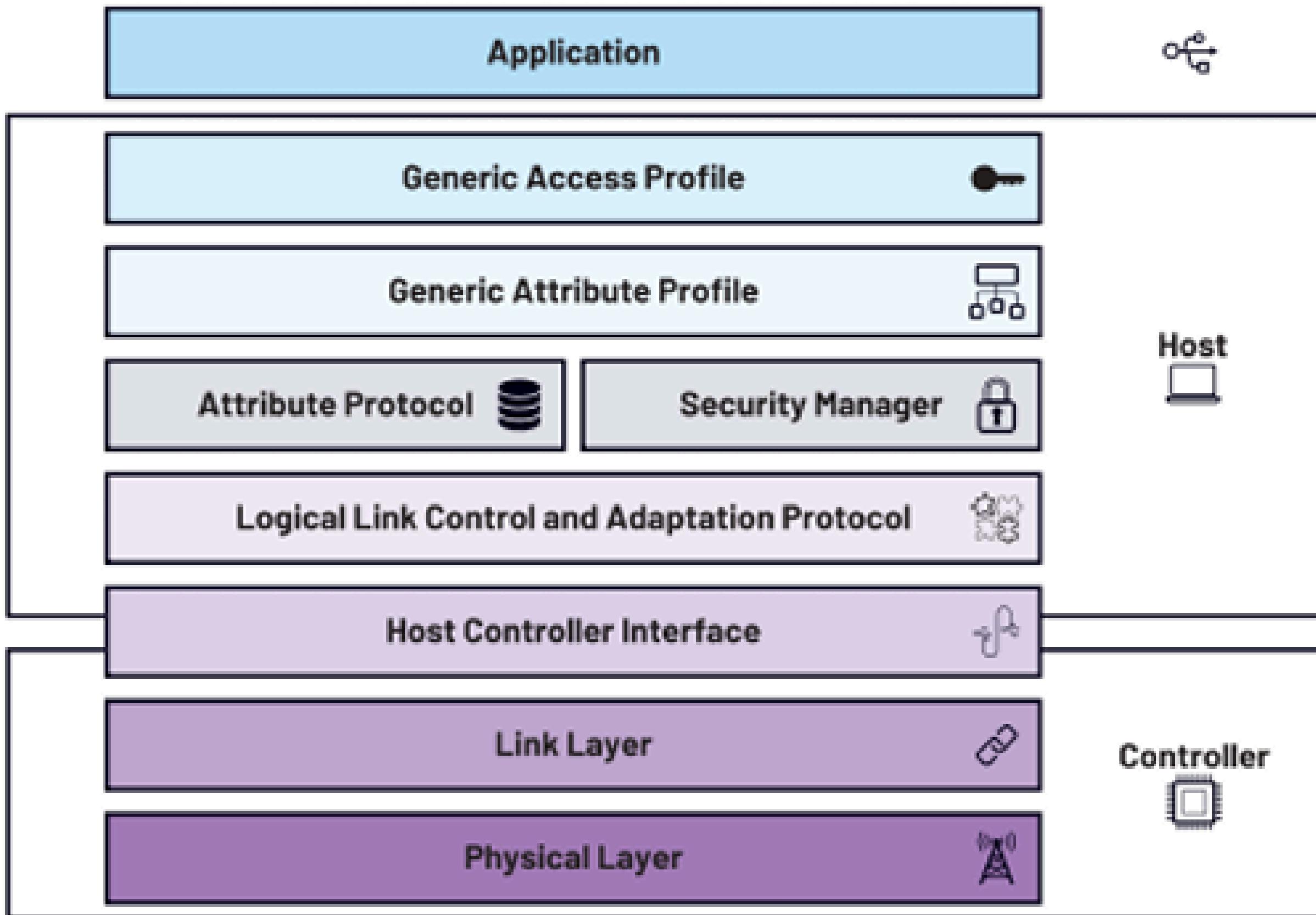
TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Advanced Monolithic Systems. (n.d.). AMS1117 Datasheet. Truy cập từ <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>
- [2] Analog Devices. (n.d.). Understanding the Architecture of the Bluetooth Low Energy Stack. Truy cập từ <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/understanding-architecture-bluetooth-low-energy-stack.html>
- [3] David M.Pozar4ed Wiley, 2012, Microwave_Engineering
- [4] Espressif Systems. (2024). ESP32-C3 Hardware Design Guidelines. Truy cập từ https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32 c3_hardware_design_guidelines_en.pdf
- [5] Espressif Systems. (2025). ESP32-C3 Technical Reference Manual. Truy cập từ <https://www.espressif.com>.
- [6] Nthatisi Hlapisi. (2023, June 9). Dive Into the BLE PHY Layer—The Basics of Bluetooth LE Radio. AllAboutCircuits. Truy cập từ <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/dive-into-the-bluetooth-low-energy-physical-layer-the-basics-of-ble-phy-radio/>
- [7] OSEPP Electronics. (n.d.). DHT11 Humidity & Temperature Sensor – Technical Data Sheet (Translated Version). Truy cập từ <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>

7. Q&A

(5 mins)

BACK UP

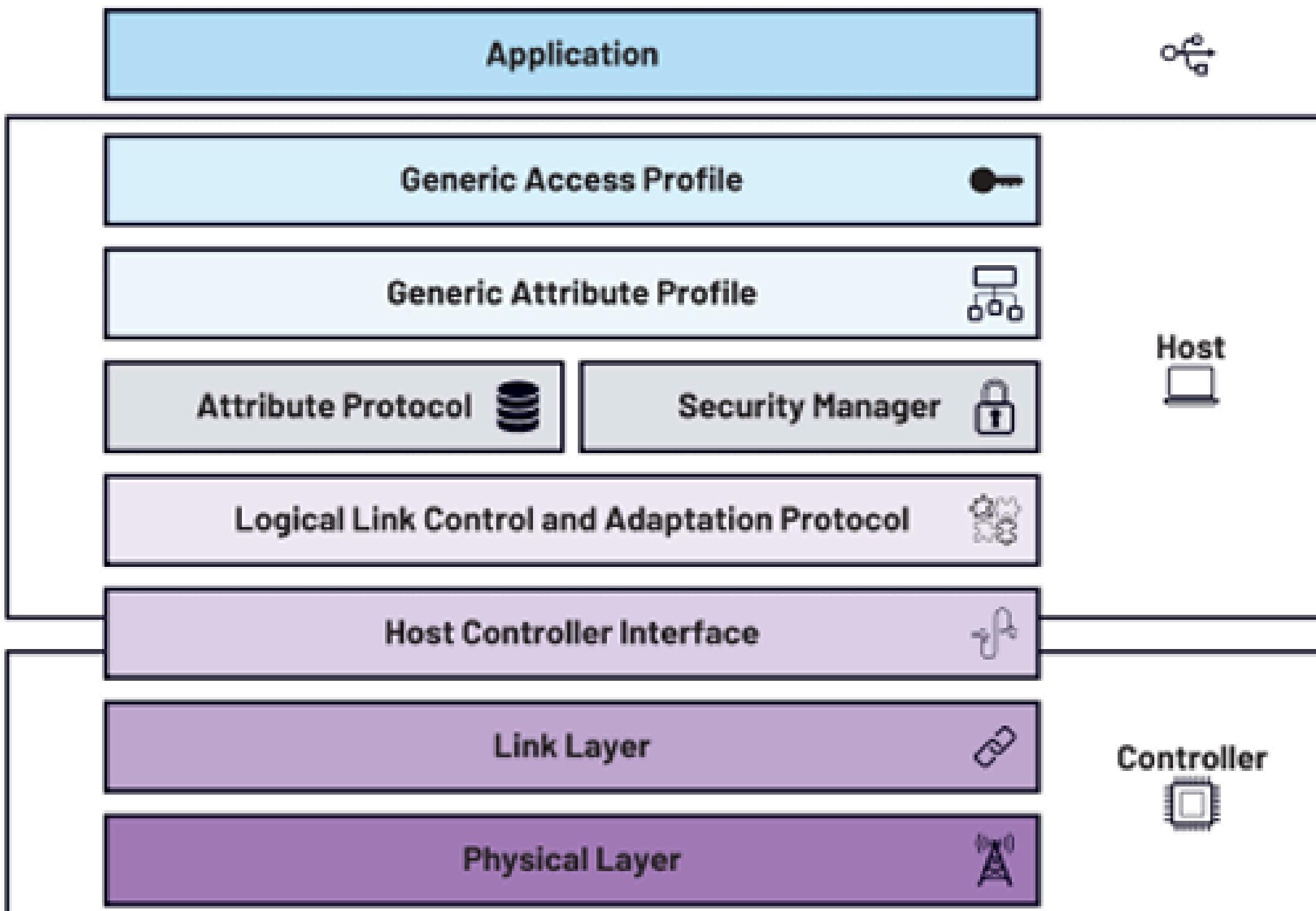


BACK UP



GAP là lớp cao nhất của Host, bắt buộc trên mọi thiết bị BLE, quy định cách phát hiện-kết nối-bảo mật và các vai trò như broadcaster/observer (khi không kết nối).

BACK UP



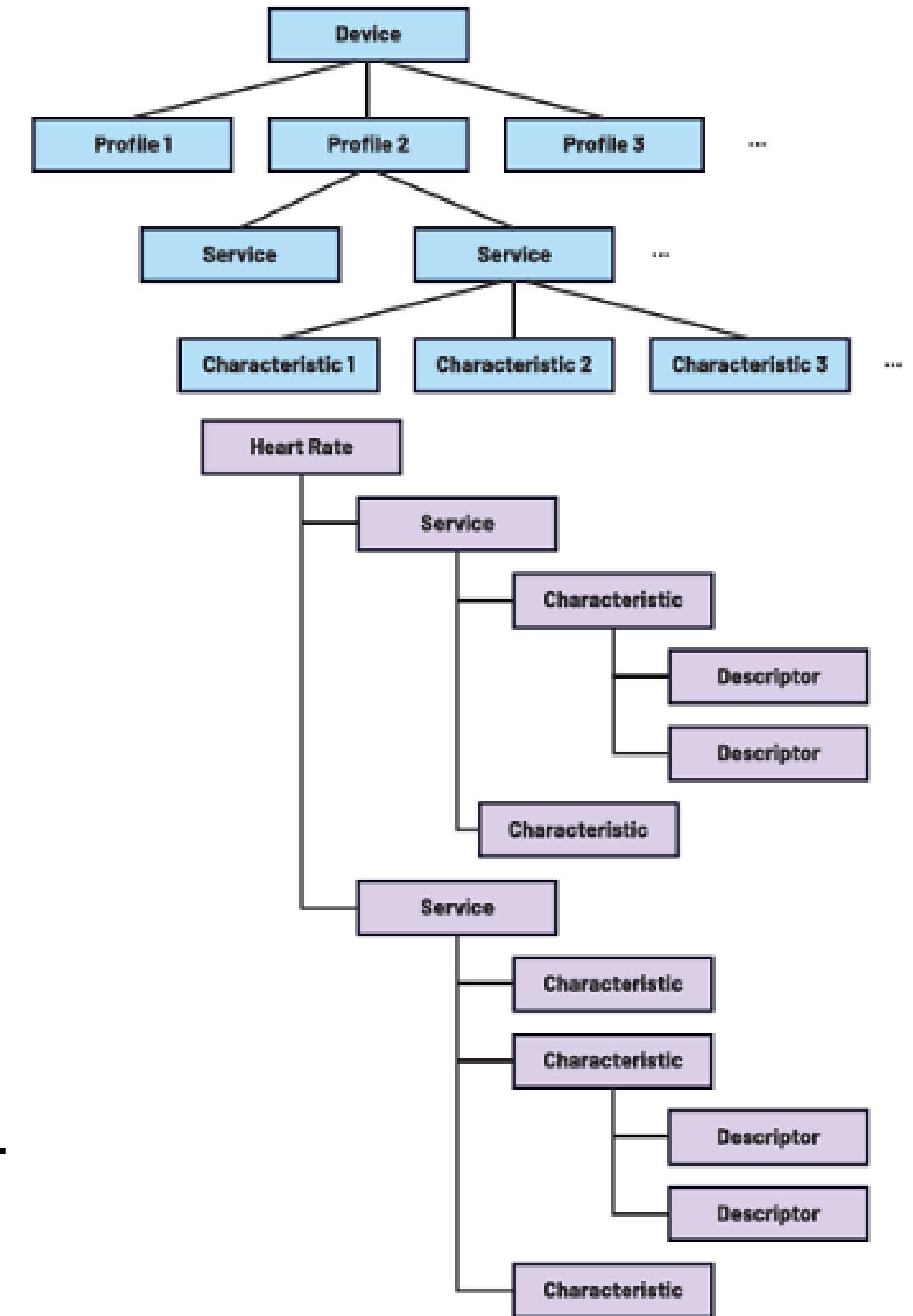
Kiến trúc BLE stack gồm 3 lớp:
Application (logic ứng dụng)

Host (GAP/GATT/ATT/SMP
quản lý kết nối & dữ liệu)

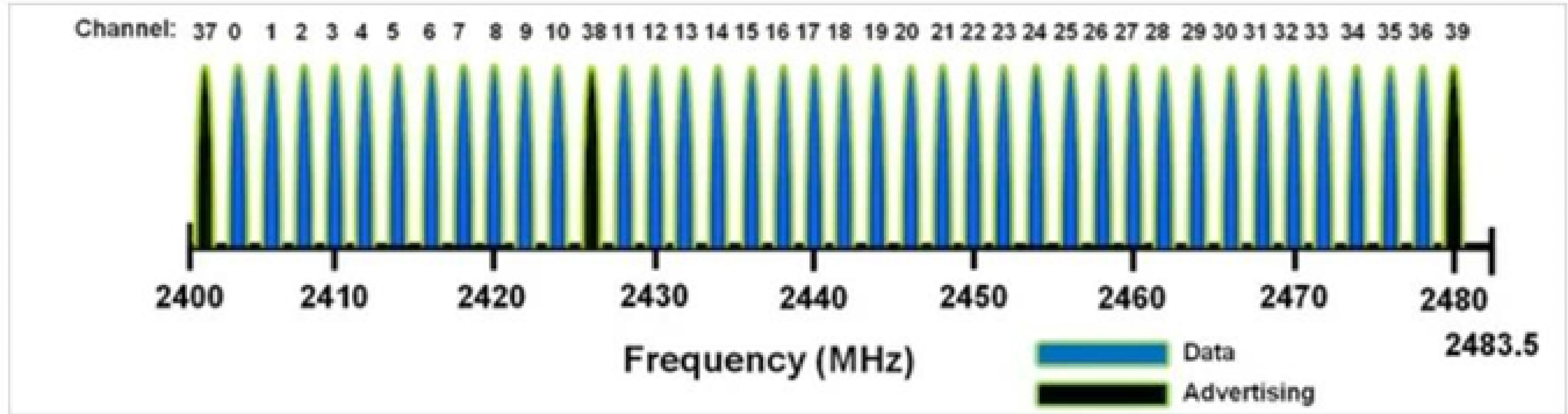
Controller (radio PHY/LL
truyền-nhận, nhảy tần, điều
chế) phối hợp để giao tiếp BLE
tin cậy

BACK UP

GATT ở lớp Host định nghĩa cách tổ chức và trao đổi dữ liệu BLE qua các thủ tục như discovery, read/write, notify/indicate, với các profile chuẩn để tương thích đa thiết bị hoặc profile tùy biến theo ứng dụng.



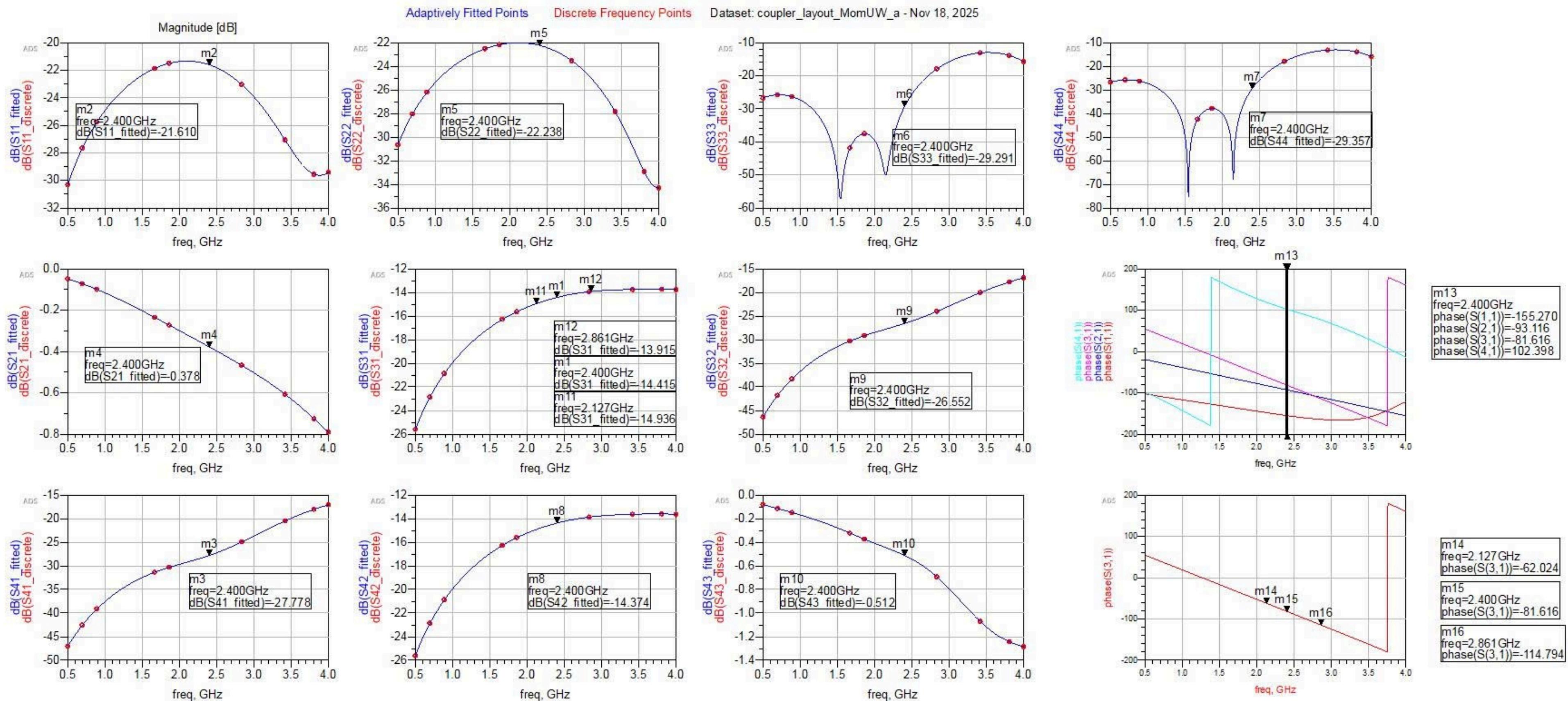
BACK UP



BLE hướng đến ứng dụng điện năng thấp, truyền dữ liệu không thường xuyên; dùng 40 kênh RF, trong đó chỉ 3 kênh dành cho advertising để thiết bị được phát hiện nhanh.

BACK UP

Discrete Frequencies vs. Fitted (AFS or Linear)



BACK UP