

**Annual Progress Report Institute of Space and
Plasma Sciences National Cheng Kung University**



研究生：劉嘉楷

指導教授：張博宇 博士

中華民國一零玖年肆月壹日

摘要

極紫外(EUV)光刻被認為是這一代半導體工藝中最先進的技術之一。我們通過使用放電產生等離子體(DPP)來產生 EUV 光刻光源。為了生成 DPP，我們建立了一個 1-kJ 的脈衝功率系統來壓縮電漿槍產生的電漿羽流。該系統由 20 個總電容為 5 μ F 的電容器、2 個軌道間隙開關、1 個多級觸發系統、1 個平行板和多條同軸傳輸線、高壓電源以及真空系統所組成。當充電至 20 kV 時，系統會儲存 1 kJ 能量。它提供的電流峰值為 110 ± 20 kA，上升時間為 1510 ± 60 ns，輸出功率約為 700 MW。而在此我們的目標是要將脈衝功率系統的軌道間隙開關校正定位器以及能夠用於測量大電流的 Rogowski coil 設計並完成。前者主要用於校正脈衝功率系統南、北翼的軌道間隙開關，兩電極與刀鋒電極間的距離；後者主要架設於脈衝功率系統主系統內部，以電流磁場所產生感應電壓的方式測量系統的放電電流大小，由於一般電流計無法負荷此脈衝功率系統的極大電流，所以 Rogowski coil 是本系統必備設備之一。

目錄

一、 目標

二、 脈衝功率系統

(一) Electrode spacer

(a) 構造

(b) 製作方式

(c) 結論

(二) Rogowski coil

(a) 構造

(b) 製作方式

(c) 量測公式

(d) 計算結果

(e) 結論

三、 總結

四、 附錄一

(一) Electrode spacer 工程圖

(二) Rogowski coil 實驗圖

一、目標

預計於 2020 年暑假至 2021 年 6 月之間完成，我的碩士論文題目為「使用放電產生電漿（DPP）的 EUV 光刻光源」，規劃達成的步驟如下：

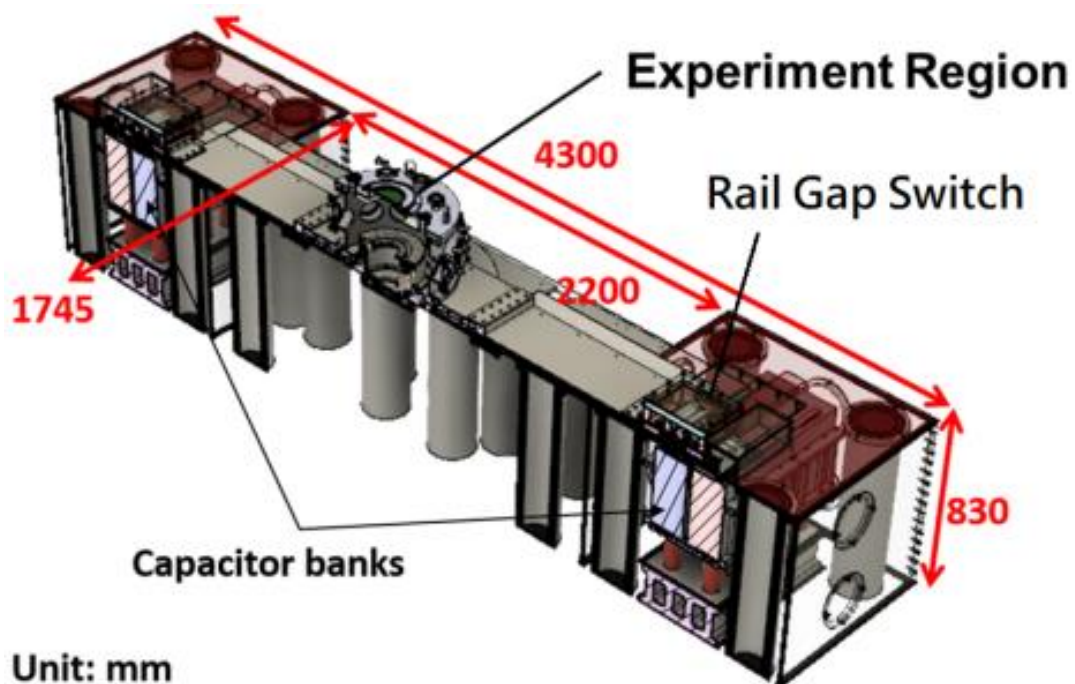
- (1) 2019 暑假至 2019 年底:製作出電極定位器(Electrode spacer)
- (2) 2019 年底至 2020 年暑假:製作出脈衝功率系統所需要之 Rogowski coil 以及氣體脈衝閥系統建置
- (3) 2020 年暑假至 2020 年底:藉由氣體脈衝裝置製造出電漿羽流並搭配光路系統量測其羽流速度
- (4) 2020 年底至 2021 年暑假:緩衝時間

目前已完成的項目(本次報告內容):

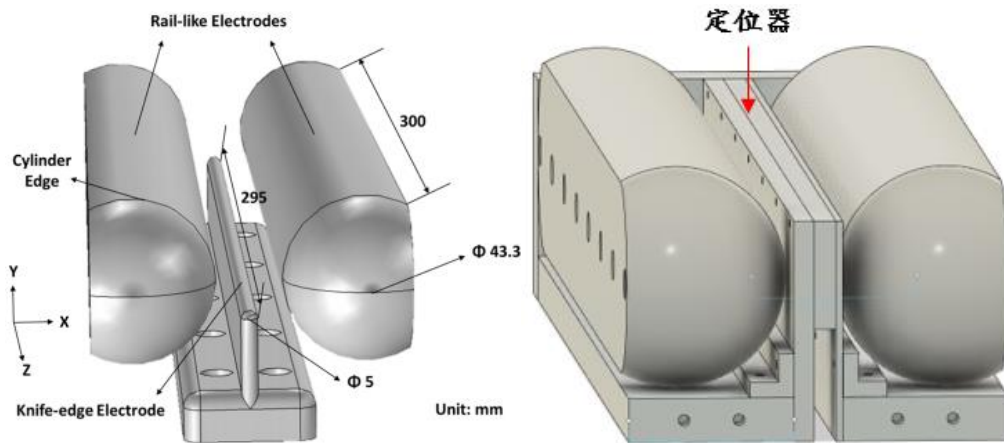
- (1) 製作 Electrode spacer，於二-(一)說明。
- (2) 設計 Rogowski coil，於二-(二)介紹。

二、脈衝功率系統

脈衝功率系統是由 20 個總電容為 $5\ \mu\text{F}$ 的電容器所組成，它提供的電流峰值為 $110\pm 20\ \text{kA}$ ，輸出功率約為 $700\ \text{MW}$ 。此系統已建立完成(圖一)，由中央同軸傳輸線兩側分為南翼與北翼，各別有 10 個電容磚組成。而南、北翼的軌道間隙開關(Rail-gap switch)中，軌道電極(Rail-like electrodes)和刀鋒電極(Knife-edge electrode)經計算後須保持固定間距，我的實驗目標是建置該系統南、北翼電極部分(圖二)定位時所需要的定位器(圖三)。



圖一:脈衝功率系統尺寸圖。



圖二:南、北翼電極與刀鋒電極尺寸圖。 圖三:電極定位時所需之定位器結構圖。

(一) 定位器

定位器的目標是為了使軌道間隙開關(Rail-gap switch)在作兩軌道電極(Rail-like electrodes)與中央的刀鋒電極(Knife-edge electrode)定位時，有固定的間距。而整個定位器之所以會重新改版整個構造，原因是因為舊版兩電極間距需求不同，再加上舊版為一體成形的構造，廠商用機器製造容易因為應力的關係產生變形，所以改用組合式的結構。相較於一體成形，組合式的結構還有一項最大的優勢是可以因地制宜，只要更改部分構造如兩側壁或是連接橋的厚度就可以改變電極間距和調整電極與中央刀鋒的距離。

(a) 構造

此結構分為六個小部分，分別是兩個基底、兩個 L 型固定座、一面薄壁、一面厚壁、一個連接橋以及一個背座。整

體是由不鏽鋼所組成，如圖四。

(1)基底為長 300 mm、寬 37.5 mm、高 10 mm 的長方體，此構造主要用於當作基支撐上方結構，如圖五。

(2)L 型固定座由一塊 10 mm x 10 mm 長方柱去除掉 6.5 mm x 6.5 mm 所形成，此構造主要用於將兩壁固定於兩基座，如圖六。

(3)薄壁是一塊長 300 mm、寬 50 mm、高 1.5 mm 的長方體，此構造主要用於決定兩電極與中央刀鋒電極的距離，如圖七。

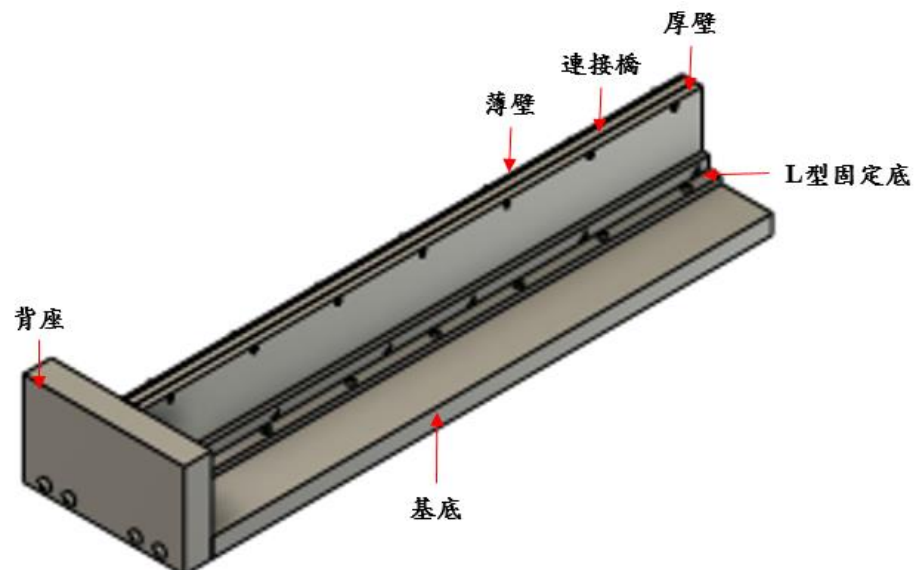
(4)厚壁部分是由一塊長 300 mm、寬 50 mm、高 4.5 mm 的長方體，此構造如同前者薄壁部分，皆使用於決定兩電極與中央刀鋒電極的距離，如圖八。

(5)連接橋是由一塊長 300 mm、寬 24.5 mm、高 5 mm 的長方體，此構造用於連接兩壁，同時也能決定兩電極間的距離，如圖九。

(6)背座是由一塊長 86 mm、寬 50 mm、高 15 mm 的長方體，此構造用於固下方兩側基座，使其不會因受到擠壓而變形失去精準度，如圖十。

整體結構如凸字型，每一個構造皆由 M2 以及 M3 螺絲

固定，並非一體成形，如此往後若要調整軌道電極(Rail-like electrodes)與刀鋒電極(Knife-edge electrode)間距時，可以僅更新薄壁或是厚壁部分結構即可，詳細各部位規格請見附錄一。



圖四:電極對位定位器構造。



圖五:基底構造。



圖六:L 型固定座。



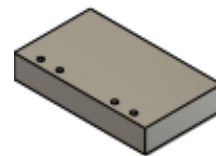
圖七:薄壁構造。



圖八:厚壁構造。



圖九:連接橋構造。



圖十:背座構造。

(b) 製作方式

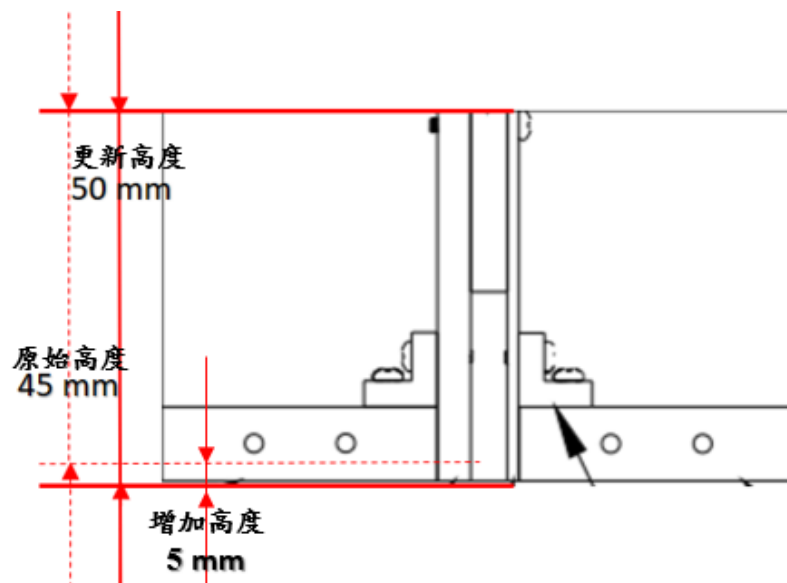
此結構是由 Fushion360 繪圖軟體繪製，從區分結構部

分、決定各部位尺寸大小到實際繪圖，並輸出成工程

圖，交給三峰鐵工廠製作。

(c) 結論

Fusion360 是繼 solidworks 後我學到的第二種繪圖軟體，雖然繪圖方式大同小異，但有些細節還是有所不同，所以一開始花了不少時間在摸索跟學習。而改版總共歷經三次，第一次主要修正連接橋與薄、厚壁螺絲位置，原始位置過低，為了避免裝上電極後會與螺絲衝突，所以把兩壁和連接橋的高度提高 5 mm，如圖十一；第二次主要是因為螺絲長度不適用，所以新螺帽較小的螺絲；第三次則是因為螺絲孔太多，使造價提高且製作難度更高，所以較前一版減少了 54 顆螺絲，如圖十二、十三，詳見附錄一。



圖十一:第一次更新前後高度差異。



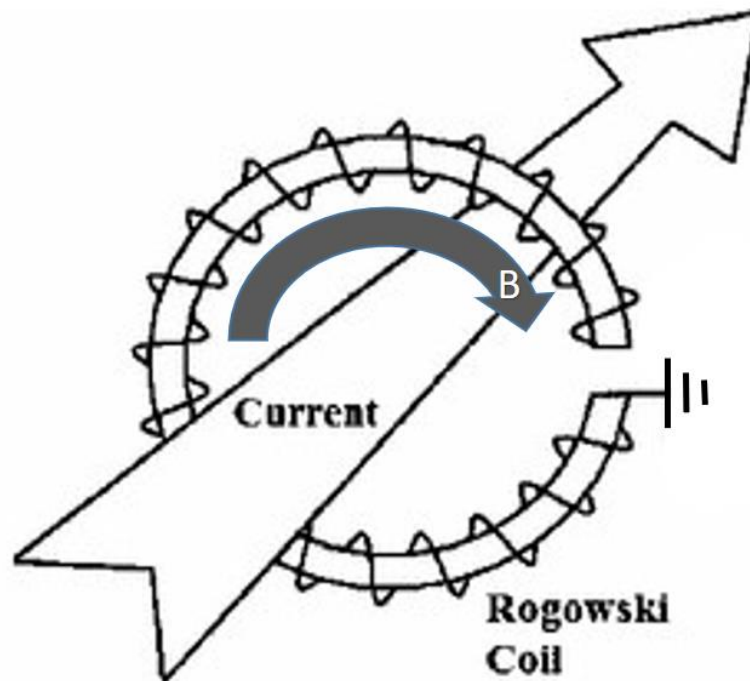
圖十二:第三次更新前構造圖。



圖十三:第三次更新後構造圖。

(二) Rogowski coil

實驗室所進行的實驗是使用~110 kA 的大電流，一般的電流計沒辦法直接量測如此大的電流，所以我們使用 Rogowski coil 進行量測。當系統所產生電流通過我們所架設的 Rogowski coil 時，如圖十四，該電流所產生的磁場將會使 Rogowski coil 的線圈產生感應電壓，藉由量測感應電壓的大小，可以得知系統放電的電流值。

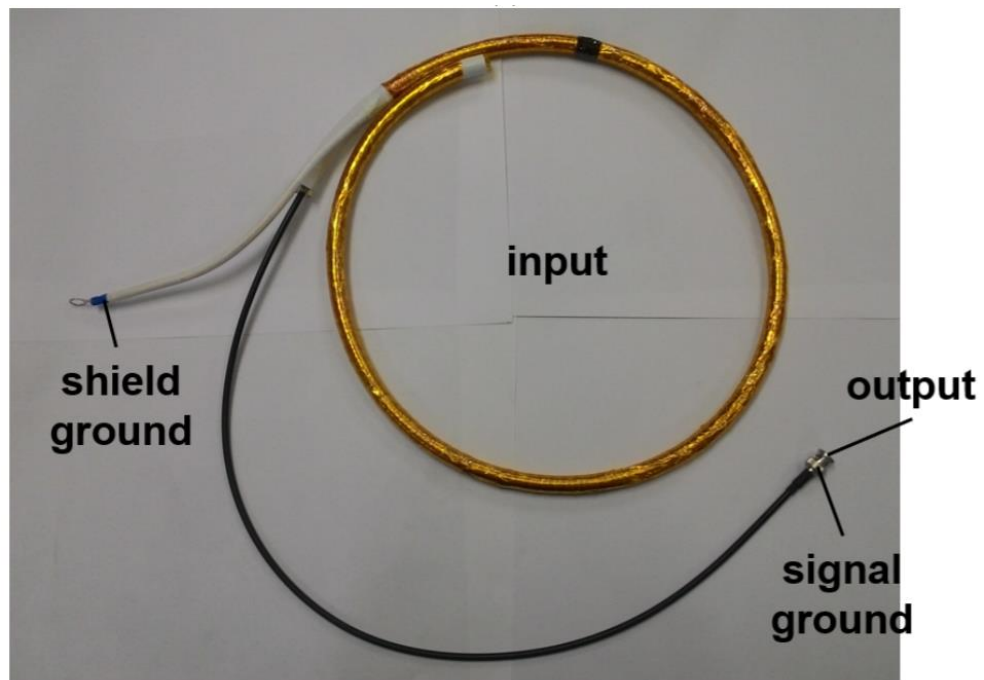


圖十四:Rogowski coil 運作原理。

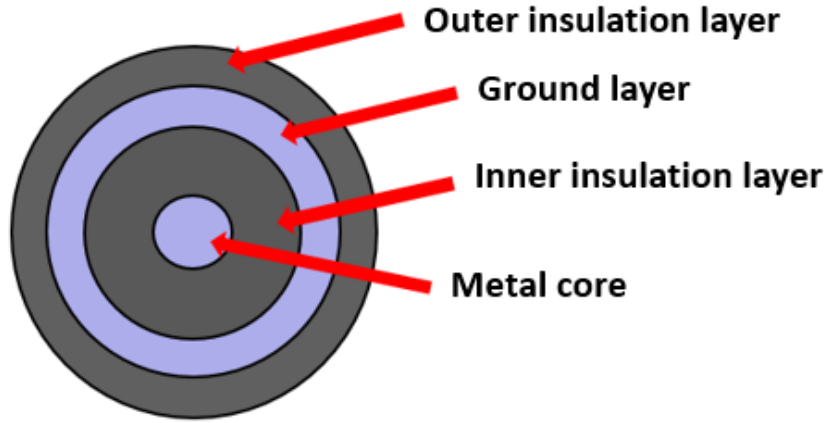
(a)構造

Rogowski coil 由一條含絕緣皮的同軸電纜(內層金屬芯+內層絕緣皮)外圍黏貼螺旋導電鋁箔膠帶組成，如圖十五所示，螺旋導電鋁箔膠帶一端接於內層金屬芯，另一端接於外層接地層，並加裝垂直 BNC 接頭，以便放置於同軸傳輸線

內部後可以將訊號端導出至示波器。圖十六是同軸電纜的截面，由外層接地線(Ground layer)與內層金屬芯(Metal core)組成，並由內層絕緣皮(Inner insulation layer)與外層絕緣皮(Outside insulation layer)保護，我們就是取中心兩層作為 Rogowski coil 的核心構造。



圖十五:Rogowski coil 實體圖，input 部分為待測電流通過的範圍，shield ground 則是連接其中一端的螺旋導電鋁箔膠帶並接地，output 則是量測訊號輸出端。



圖十六:Rogowski coil 由外至內的結構依序為外層絕緣皮、接地層、內層絕緣皮以及內層金屬芯，我們會在內層絕緣皮外黏貼一層導電鋁箔膠帶，並剝除接地層以及外層絕緣皮。

(b)Rogowski coil 的輸出電壓與被量測之電流的關係:

給定一個已知的 I_{in} ，則藉由量測所感應出的 V_{out} 時，便可

以對 $M_{Rogowski\ coil}$ 作校正。當電流 I_{in} 通過如圖十八中的

Rogowski coil 中間時，會在 Rogowski coil 大圓上產生磁場:

$$B = \frac{\mu_0 I_{in}}{2\pi L} \quad (1)$$

由法拉第定律得知，螺線導電膠帶一圈能感應出的電壓為:

$$V_{per\ coil} = -\frac{d}{dt}(B \times \pi \times r^2) \quad (2)$$

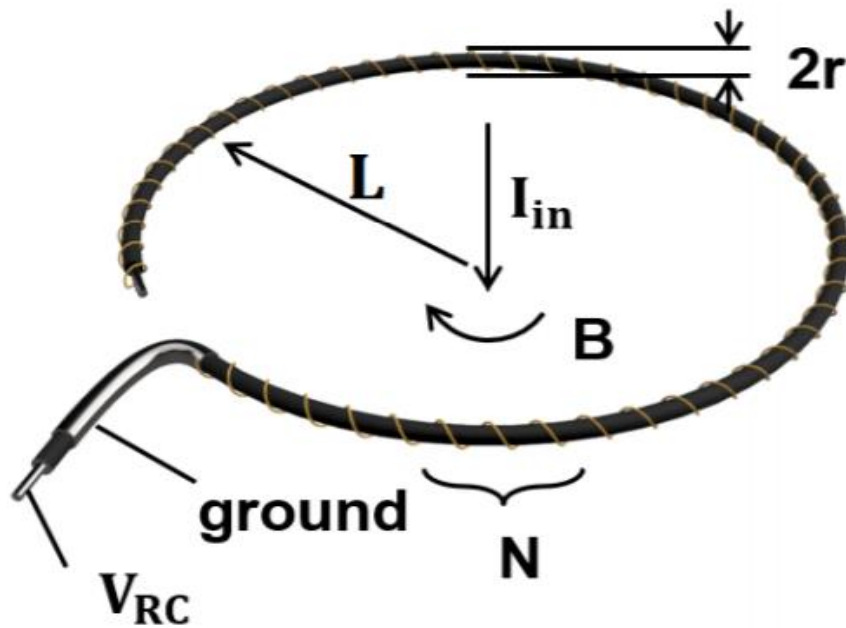
因為纏繞圈數為 N 圈，故輸出電壓 V_{out} 為(2)式的 N 倍，即

$$V_{out} = N \times \left[-\frac{d}{dt}(B \times \pi \times r^2)\right] \quad (3)$$

將(1)式代入(3)式可得:

$$V_{out} = -\frac{r^2 N \mu_0}{2L} \frac{dI_{in}}{dt} = M_{Rogowski\ coil} \times \frac{dI_{in}}{dt} \quad (4)$$

其中 $M_{Rogowski\ coil} = -\frac{r^2 N \mu_0}{2L}$ 為 Rogowski coil 的互感公式。



圖十八:Rogowski coil 參數參考圖。

(c)計算結果

Pulsed-power current requirement($\frac{dI_{in}}{dt} \sim \frac{110 \text{ kA}}{1.5 \mu s}$)，經過設計以及計算後，我們歸納出了兩個版本 L(138.75 mm 以及 137.8 mm)的 Rogowski coil:

(1)使用導電鋁箔膠帶當作纏繞的螺線層搭配 PU 管，PU 管

在這裡的目的主要用於防止螺線導電層與真空腔導通。

(2)使用一般電線纏繞當作螺線層搭配 PP 管，PP 管在此目的

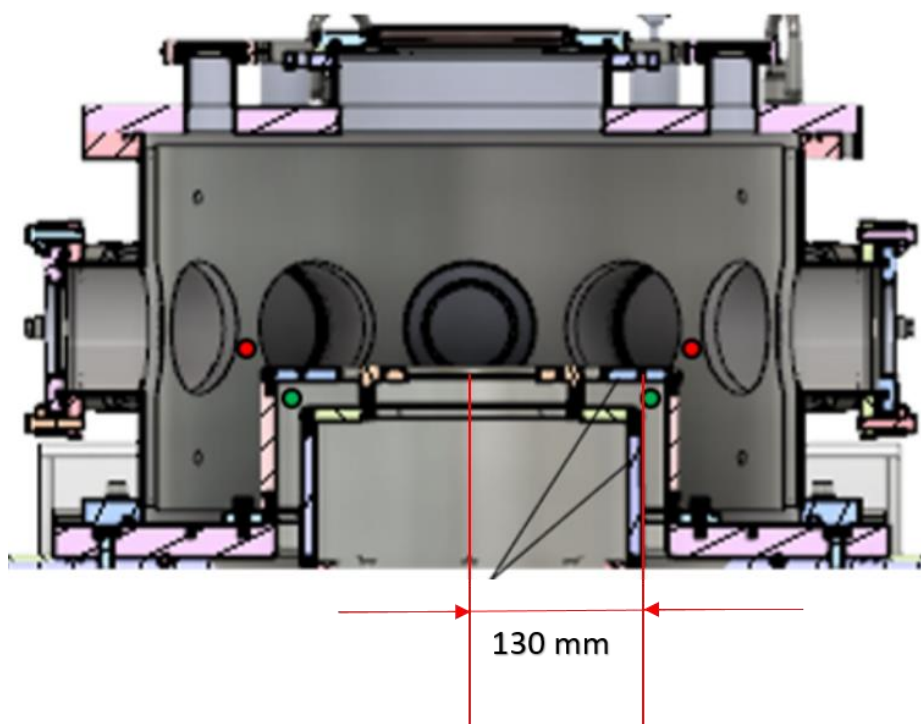
也是為了防止螺線導電層與真空腔體導通。

如上，纏繞螺旋層有兩個選擇，分別是(1)導電鋁箔膠帶；(2)

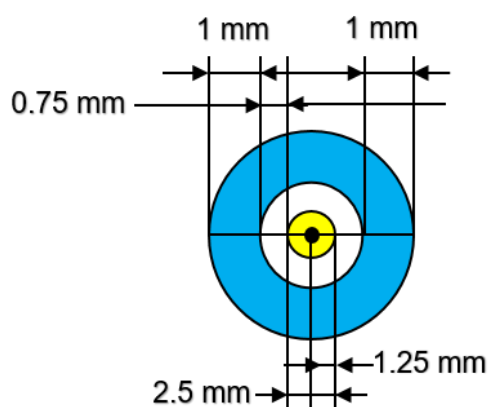
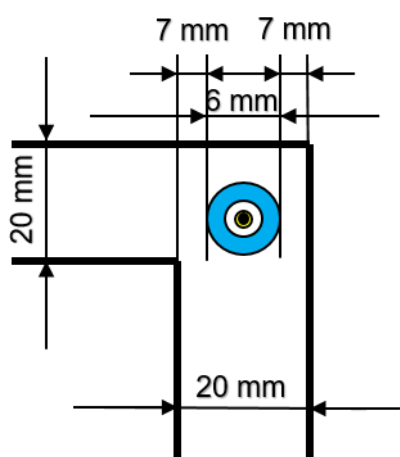
電線，他們的厚度與半徑將會影響圖十八中的 r，最後纏繞圈

數則由公式(4)決定。

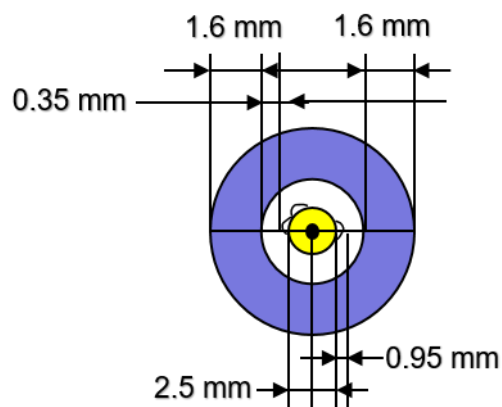
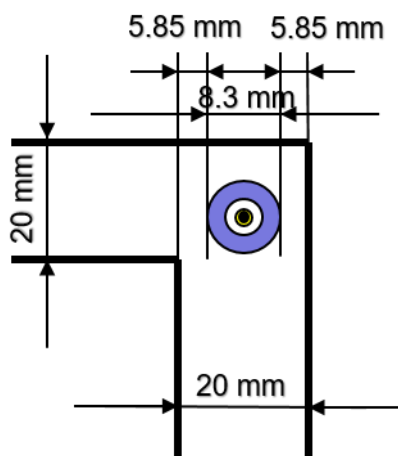
由於脈衝功率主系統腔體大小限制了 Rogowski coil 的大小，如圖十九為主系統腔體結構剖面圖，原始 Rogowski coil 放置於紅色區塊，綠色區塊則為新的 Rogowski coil 欲放置處，故我們藉由定位 Rogowski coil 來計算其半徑(L)，方法(1)的 L 為內側腔體半徑(130 mm)+腔壁與 PU 管間距(7 mm)+PU 管厚度(1mm)+單芯線與 PU 管間距(0.75mm)為 138.75 mm，如圖二十、二一。方法(2)的 L 則是內側腔體半徑(130 mm)+腔壁與 PU 管間距(5.85 mm)+PU 管厚度(1.6 mm)+螺線圈與 PU 管間距(0.35 mm)為 137.8 mm，如圖二十二、二十三。螺線圈半徑(r)，於方法(1)因為導電膠帶厚度遠小於 1 mm 故我們將此半徑視為中軸半徑 1.25 mm，而方法(2)由於使用銅線纏繞作為螺線圈，故需再加上螺線圈與中軸的距離為 2.2 mm。



圖十九:脈衝功率系統主腔體剖面圖。



圖二十:Rogowski coil 於腔體剖面圖。 圖二十一:Rogowski coil 規格剖面。



圖二十二:Rogowski coil 於腔體剖面圖。 圖二十三:Rogowski coil 規格剖面。

兩者規格如下:

	Tape with PU tube	Wire with PP tube
Rogowski coil 半徑(L)	138.75 mm	137.8 mm
螺線導電層半徑(r)	1.25 mm	2.2 mm
螺線導電層圈數(N)	130 turns	41 turns

表一:Rogowski coil 兩版本設計比較表。

最後，我們將採用方法一(導電鋁箔膠帶和 PU 管)來製作 Rogowski coil，因為相較之下第一個版本的導電線圈纏繞數較多，故所量測到的感應磁場較廣，再者 PU 管較易取得，且質地柔軟可塑性較 PP 管高，唯一缺點則是纏繞圈數較多，技術性較高。

(d)製作方式

我們將一條含 BNC 接頭的同軸電纜線加工成 Rogowski coil，因此先取一條含 BNC 接頭的同軸電纜線，此同軸電纜構造如圖十六，由最外層的絕緣皮、內層接地層、內層絕緣皮以及內層金屬芯所組成，詳細製作步驟如下:

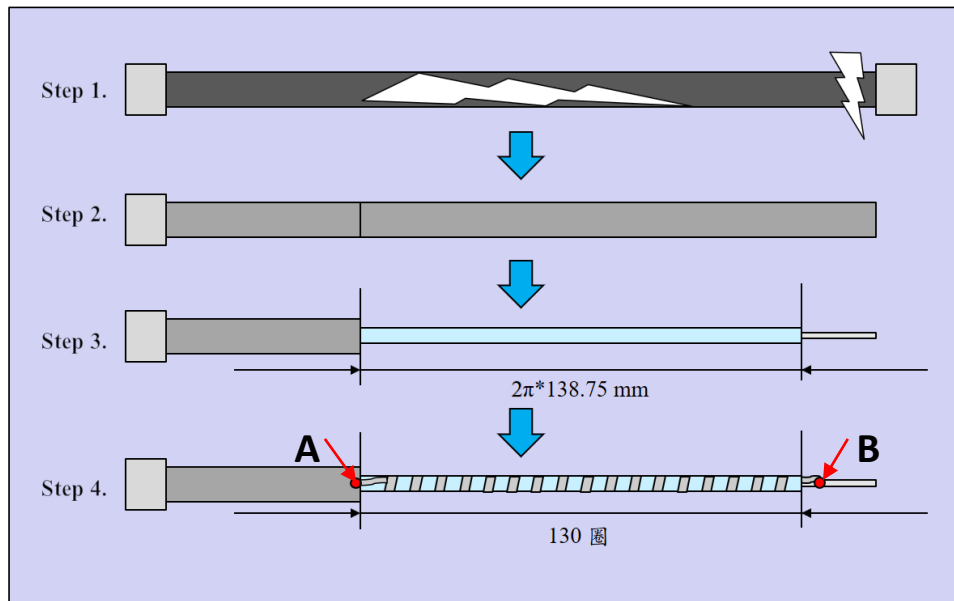
- (1) 將其中一頭 BNC 接頭裁斷，並剷除外層絕緣皮。
- (2) 再把內層接地層去除約 $2\pi L$ ，其中 L 為 Rogowski coil 內徑半徑長。
- (3) 將內層絕緣皮剷除一小段使內層金屬芯露出。

(4) 以寬 3 mm 的導電鋁箔膠帶作外層螺旋層，纏 130 圈，

兩圈間距 $\frac{2\pi L}{\text{number of turns}}$ 約為 6.7 mm，導電鋁箔膠帶一端

以金屬套管連接在內層金屬芯，圖十七中 B 處；另一端

連接在內層接地層，圖十七中 A 處。



圖十七:Rogowski coil 製作流程圖。

(e)結論:

目前 Rogowski coil 已製作完成，待與我們的脈衝功率

主系統校正後，即可正式運作。

三、總結

今年已完成的事項如下:

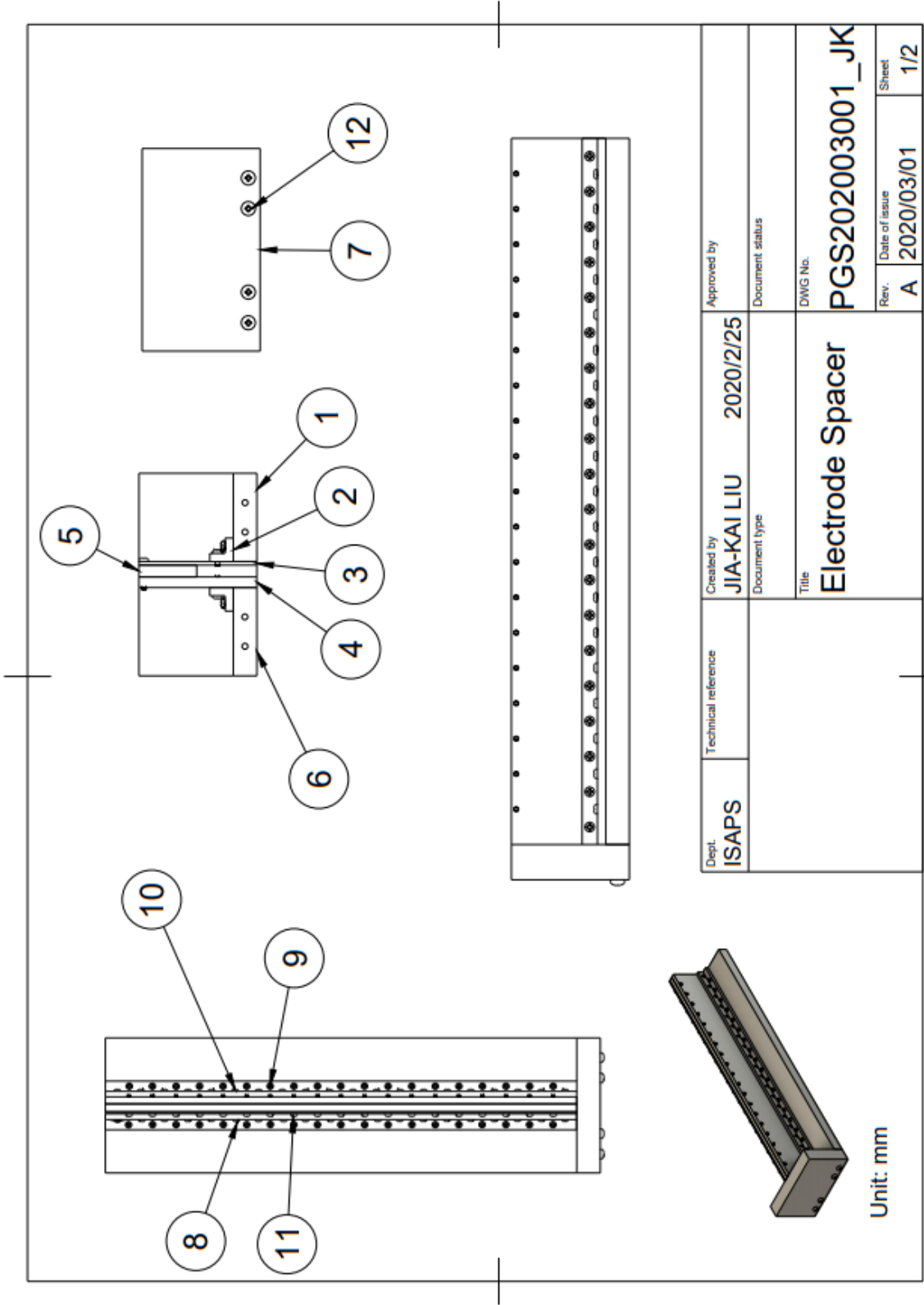
1. Electrode spacer 的設計與製造。
2. Rogowski 的設計與改良。

未來將完成的事項如下:

1. 測試新版 Rogowski coil 是否符合同軸傳輸線。
2. 完成 Rogowski coil 的製作並校正。
3. 建造脈衝氣閥欲使用的脈衝功率系統。
4. 架設紋影法量測系統(Schlieren imaging system)量測大氣
下電漿羽流的速度。
5. 將脈衝氣閥裝上真空腔體。
6. 量測真空環境下，電漿羽流的速度。

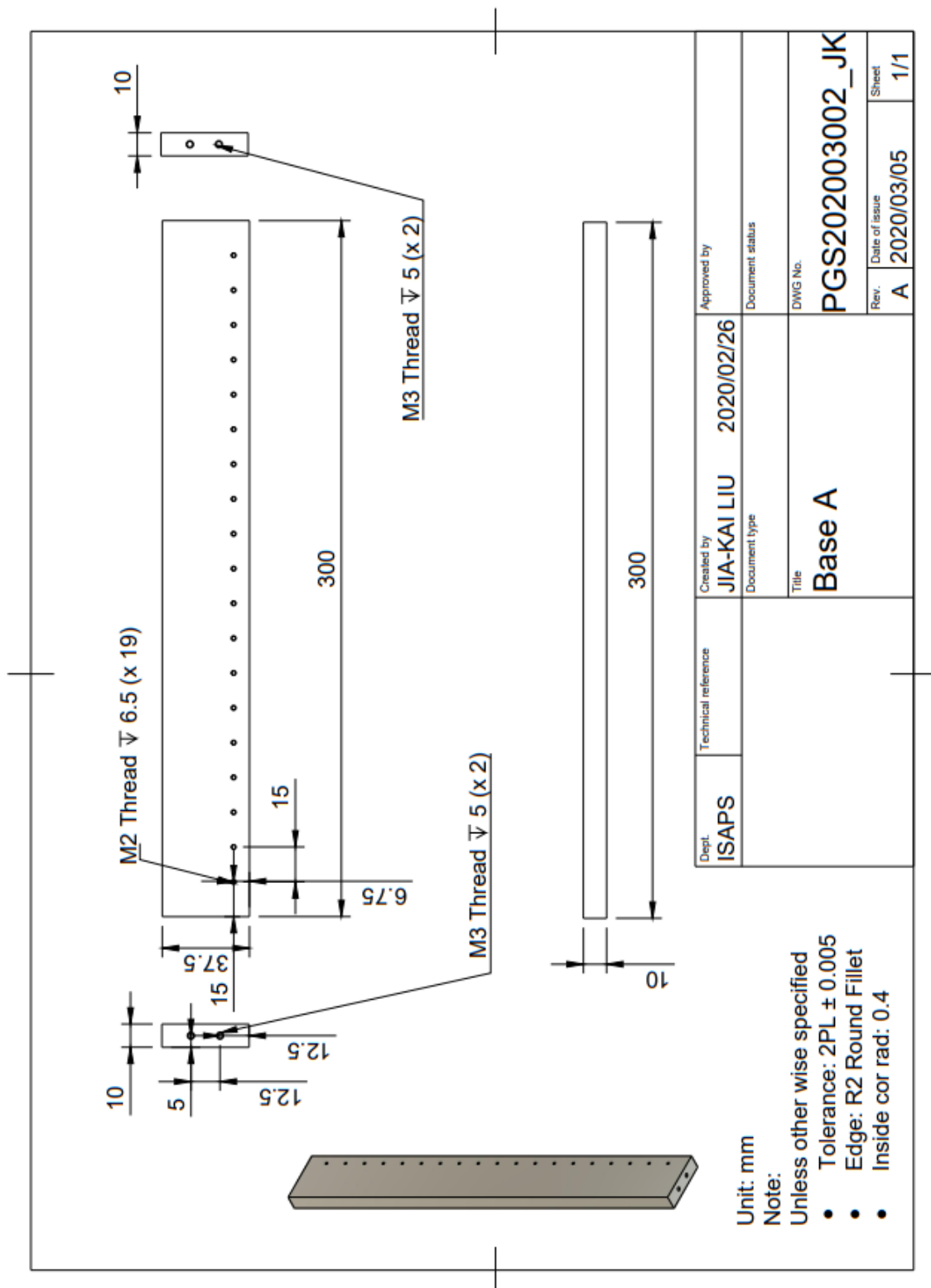
四、附錄一

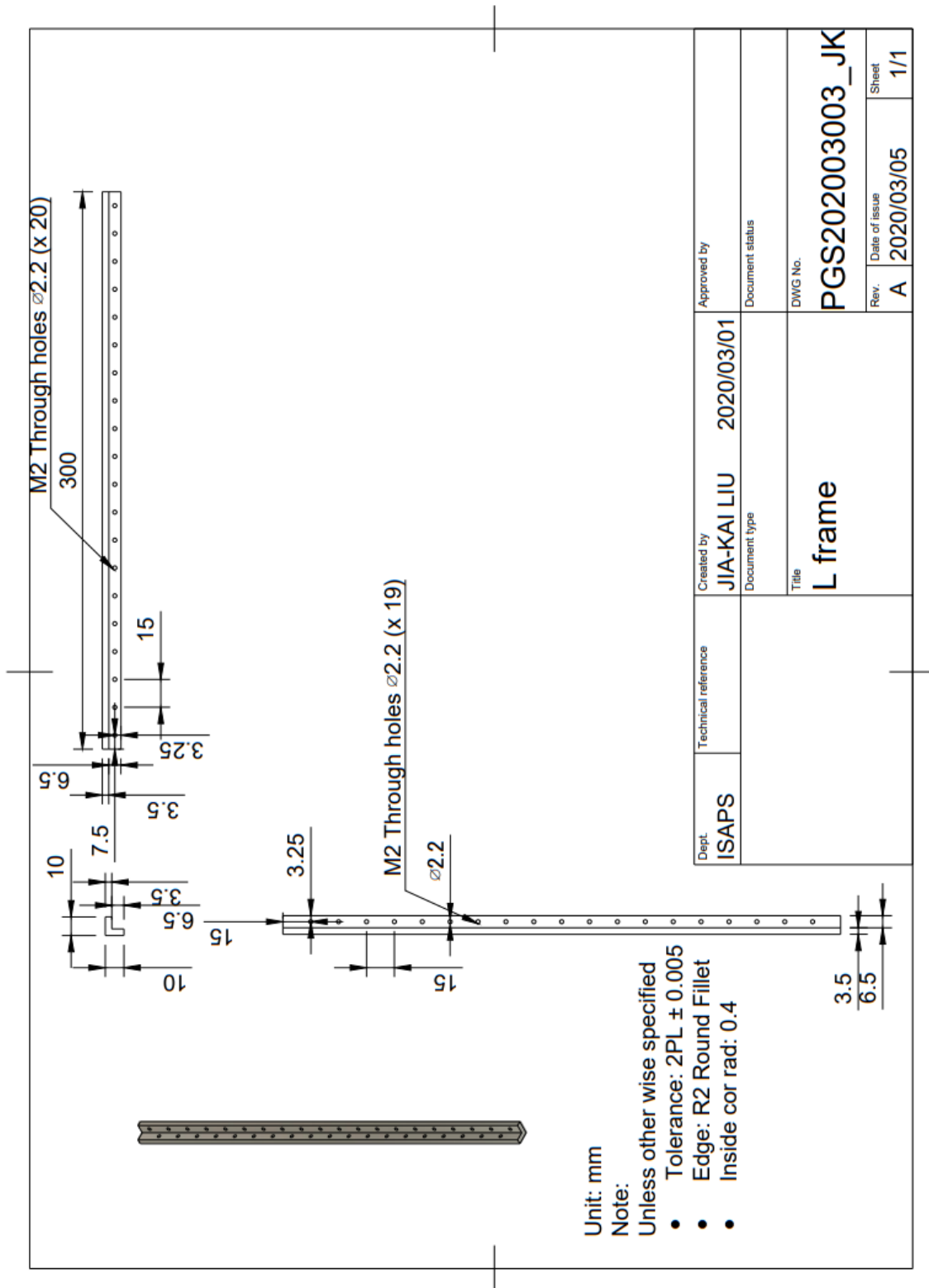
Rev A. of electrode spacer

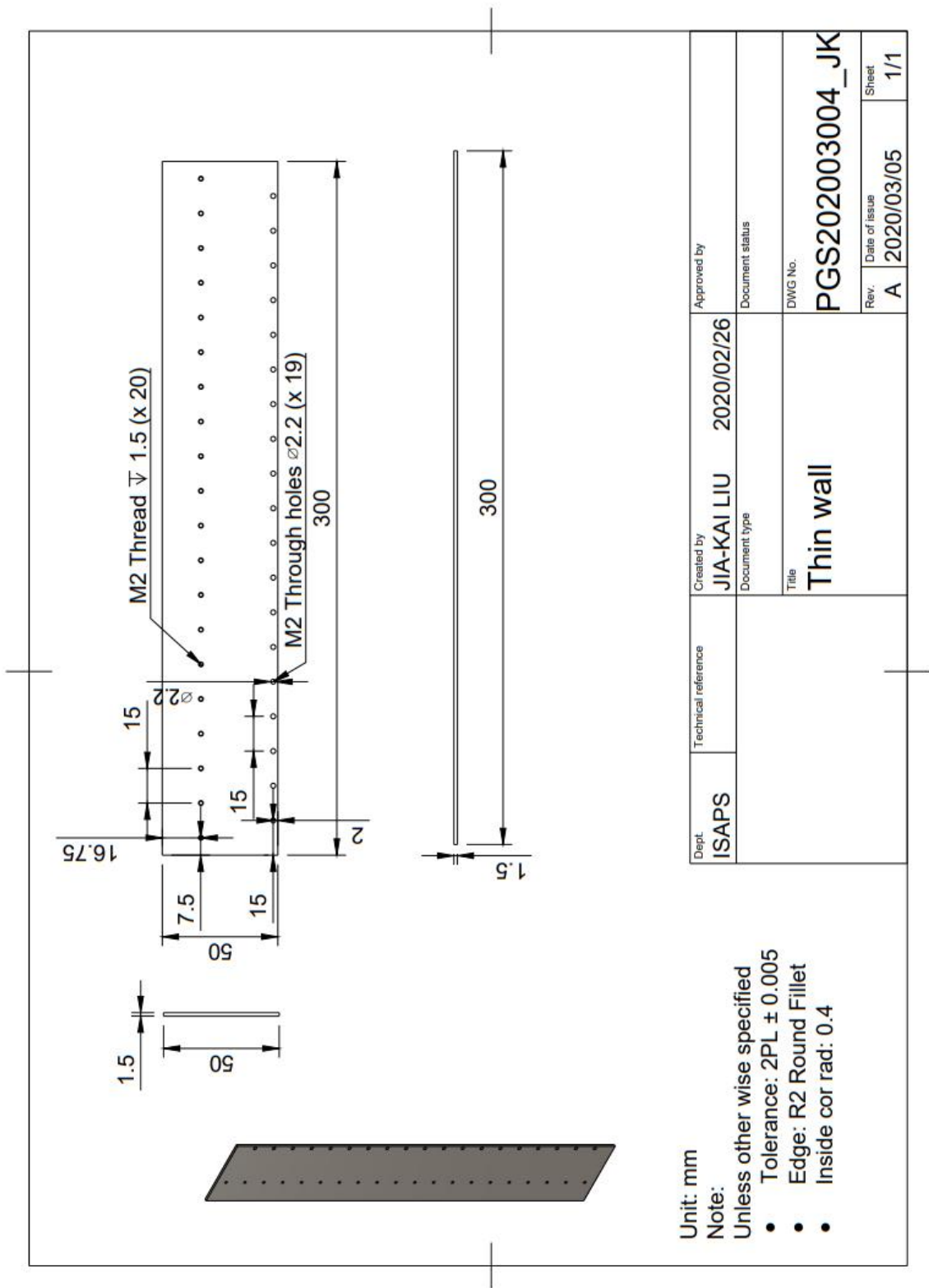


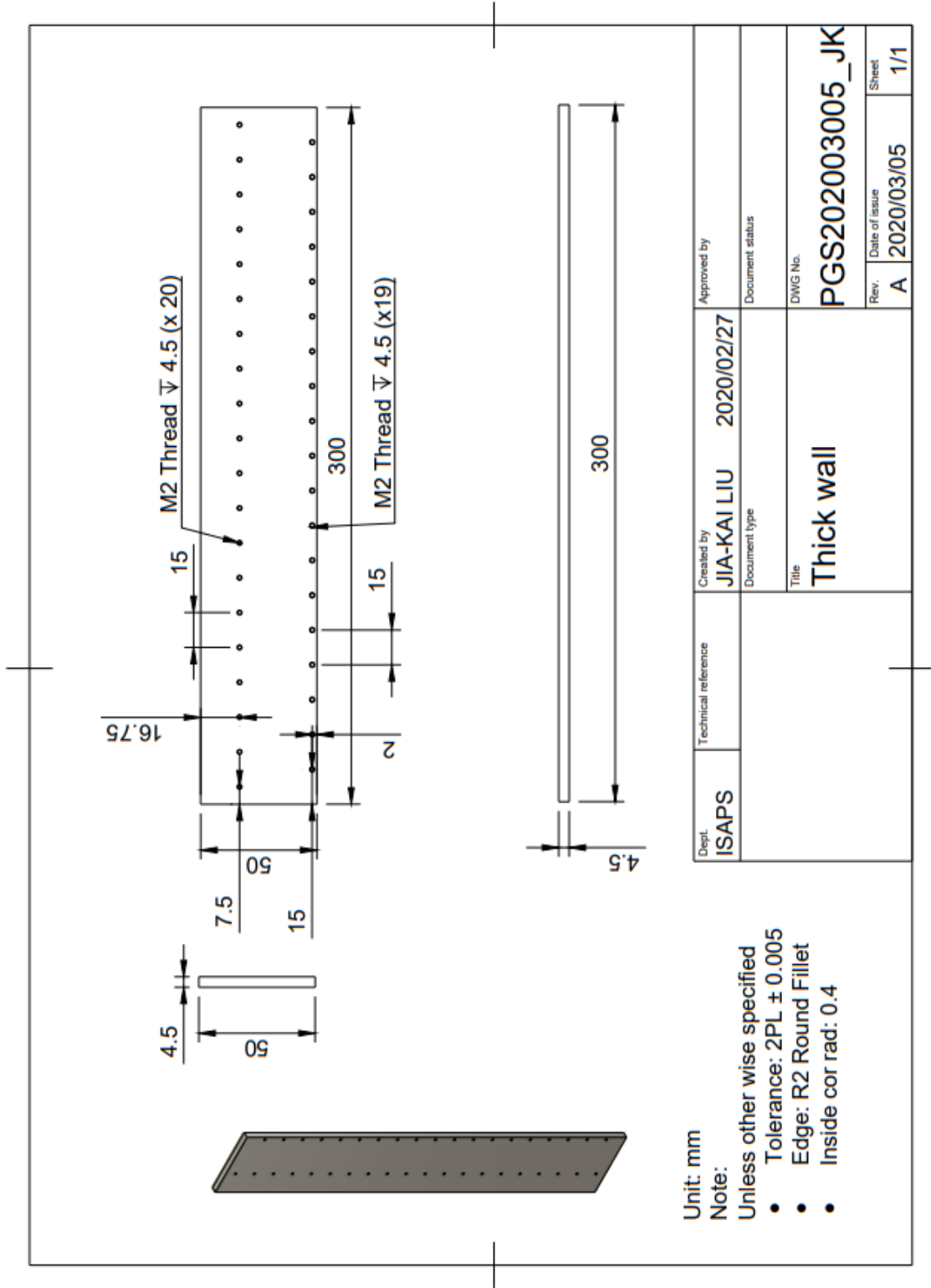
Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	PGS202003002	Base A	Stainless Steel
2	2	PGS202003003	L frame	Stainless Steel
3	1	PGS202003004	Thin wall	Stainless Steel
4	1	PGS202003005	Thick wall	Stainless Steel
5	1	PGS202003006	Bridge	Stainless Steel
6	1	PGS202003007	Base B	Stainless Steel
7	1	PGS202003008	Back	Stainless Steel
8	20		M2 5 mm	Stainless Steel
9	38		M2 10 mm	Stainless Steel
10	20		M2 7 mm	Stainless Steel
11	19		M2 12 mm	Stainless Steel
12	4		M3 18 mm	Stainless Steel

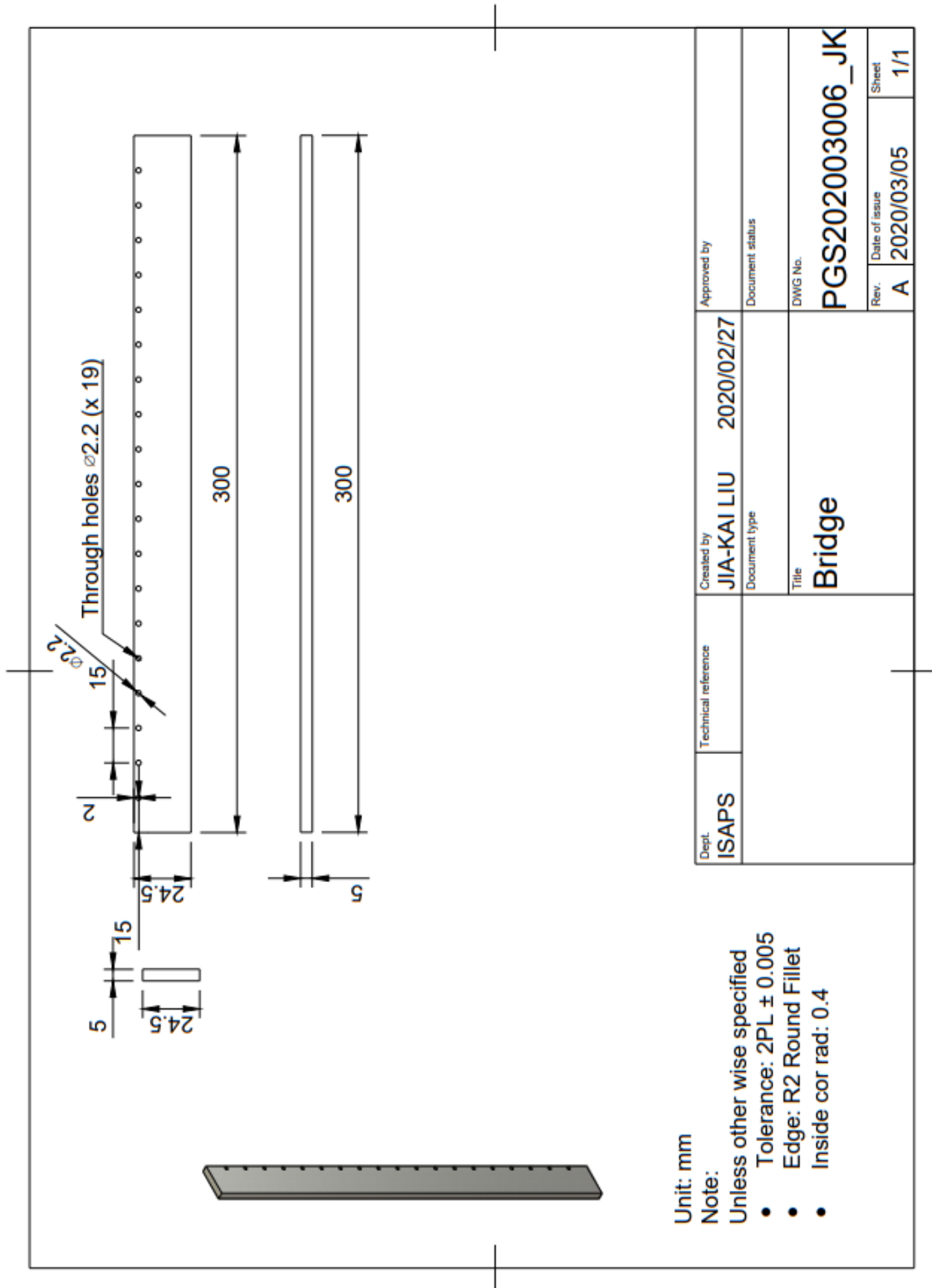
Dept. ISAPS	Technical reference	Created by JIA-KAI LIU	2020/2/25	Approved by
		Document type		Document status
		Title Electrode Spacer		DWG No. PGS202003001_JK
		Rev. A	Date of issue 2020/03/01	Sheet 2/2

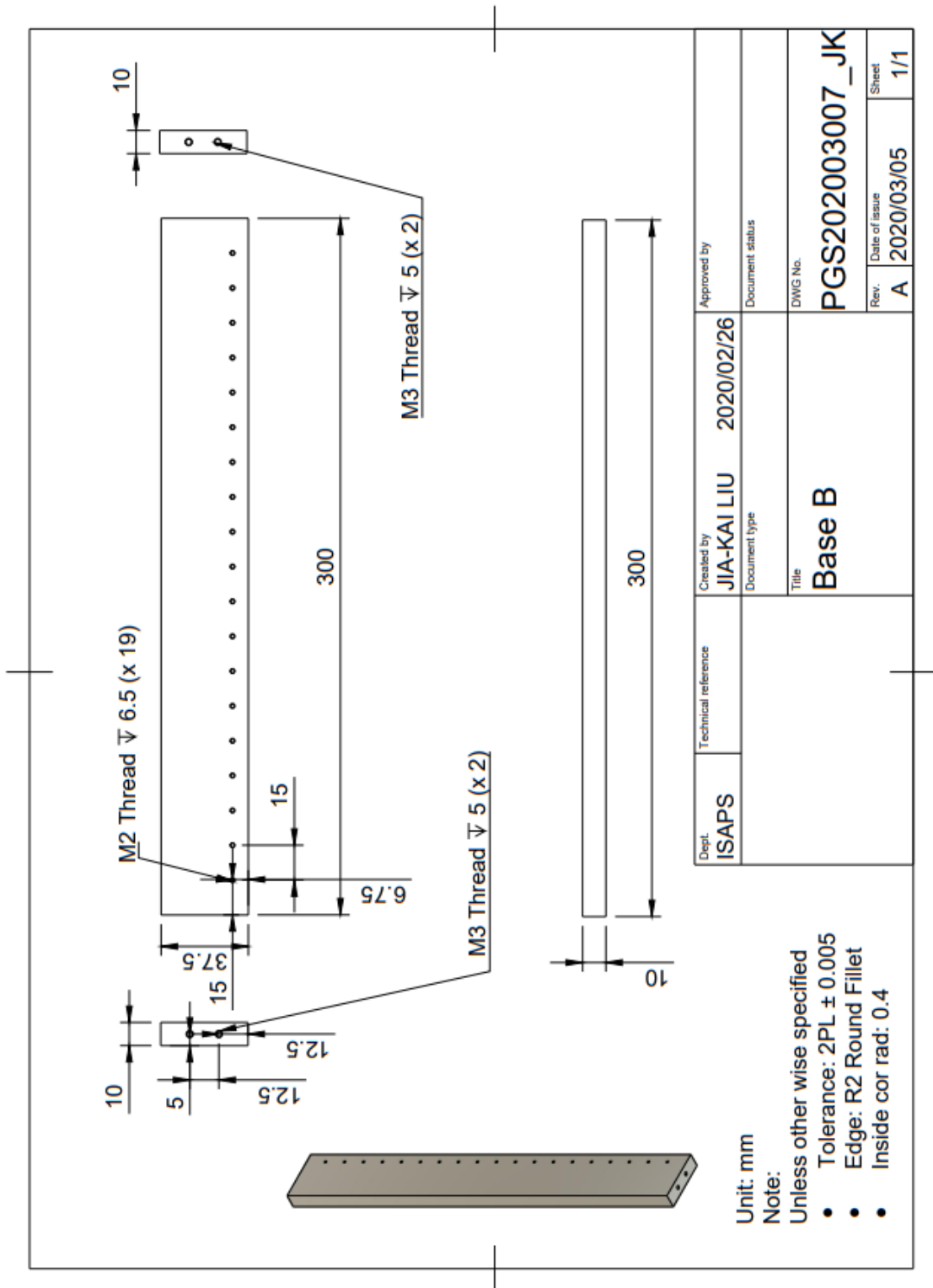


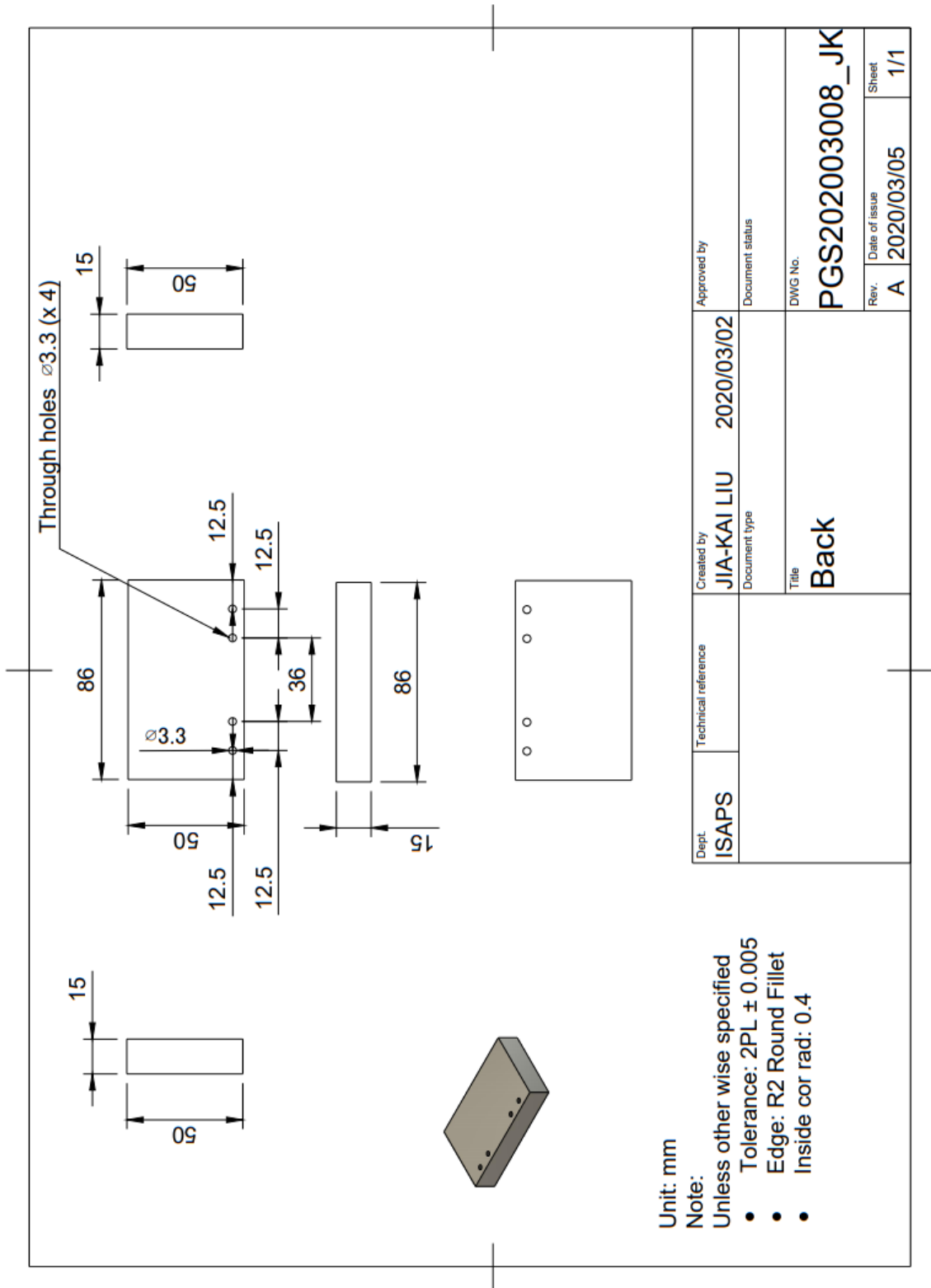




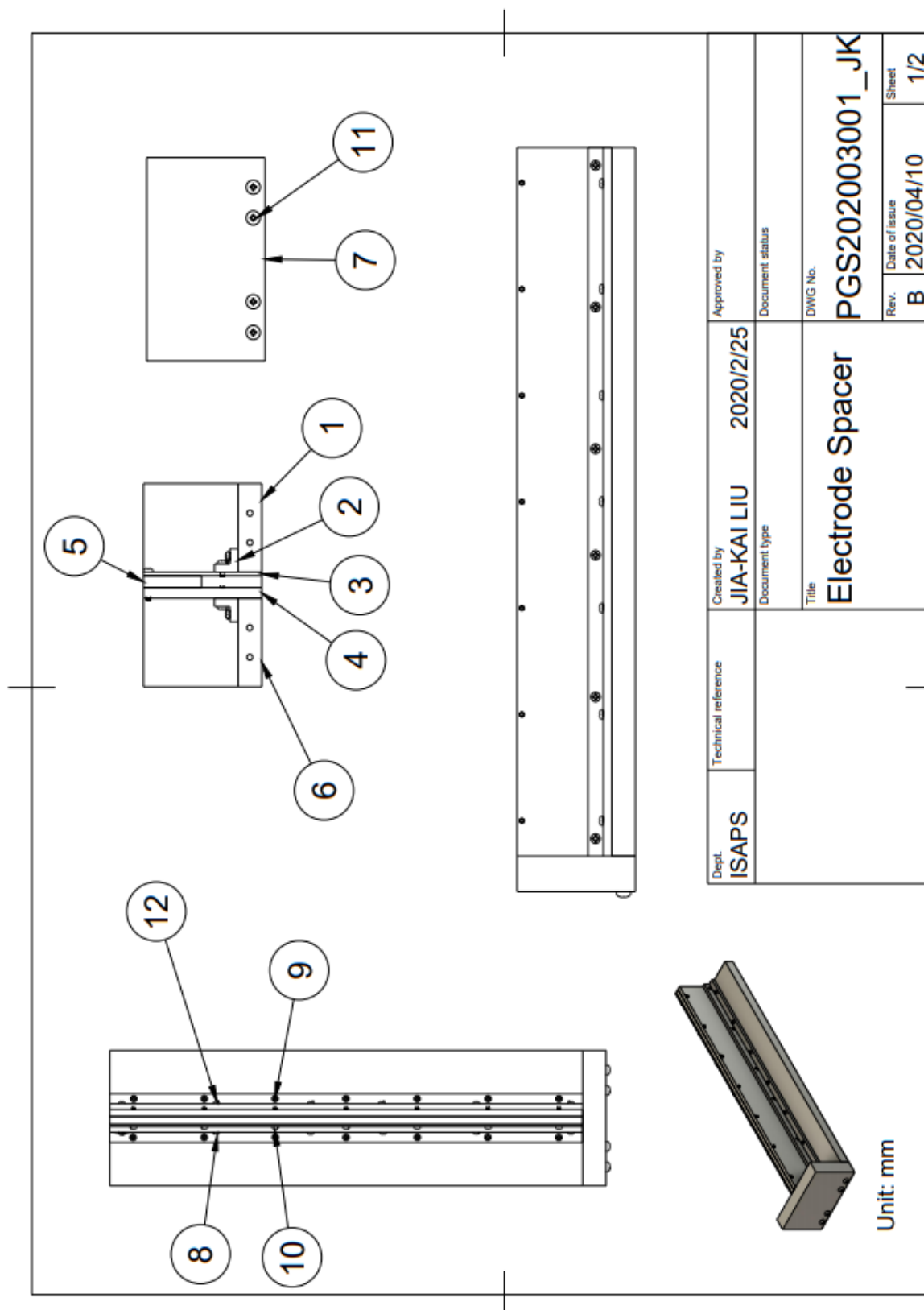






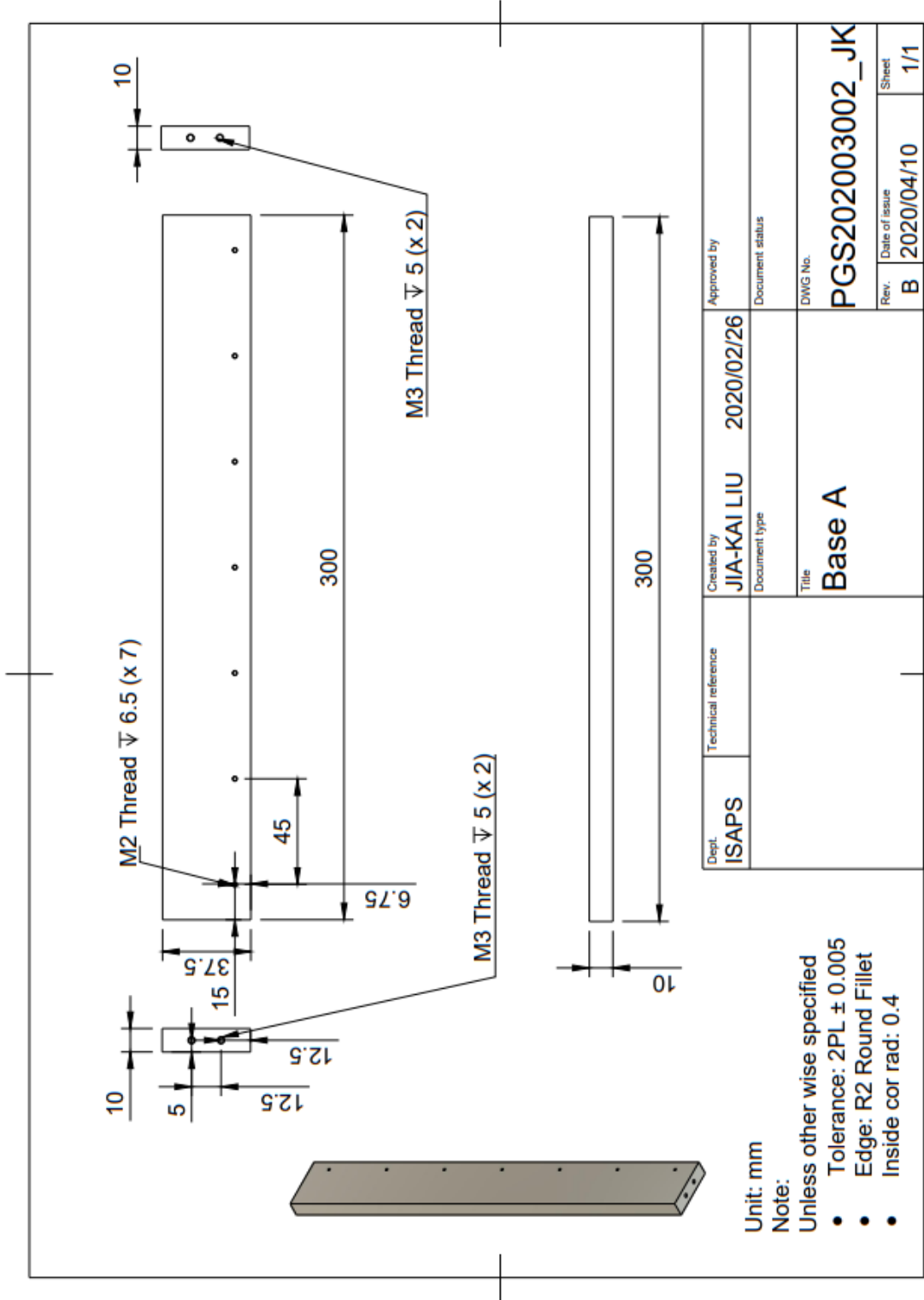


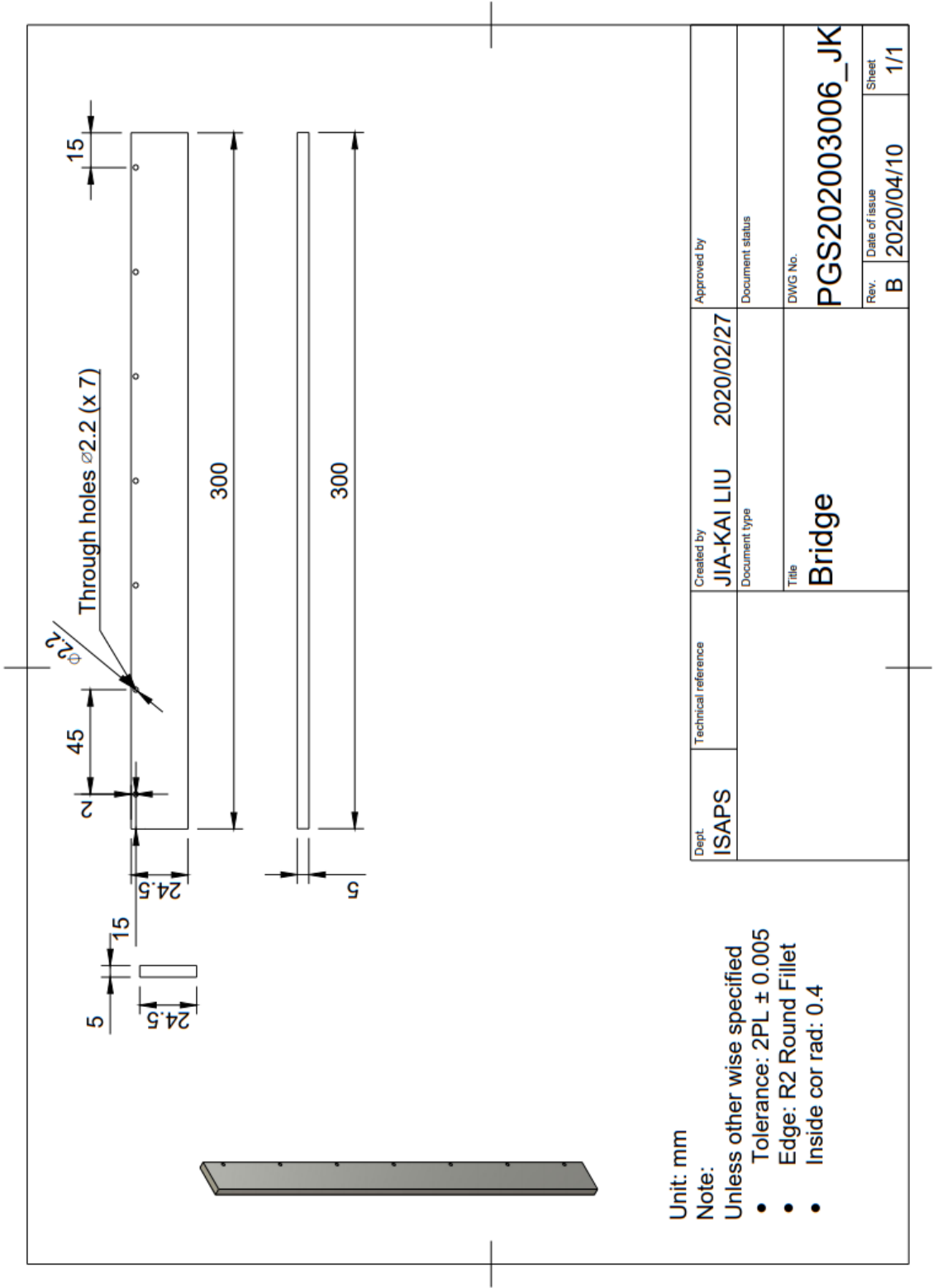
Rev B. of electrode spacer



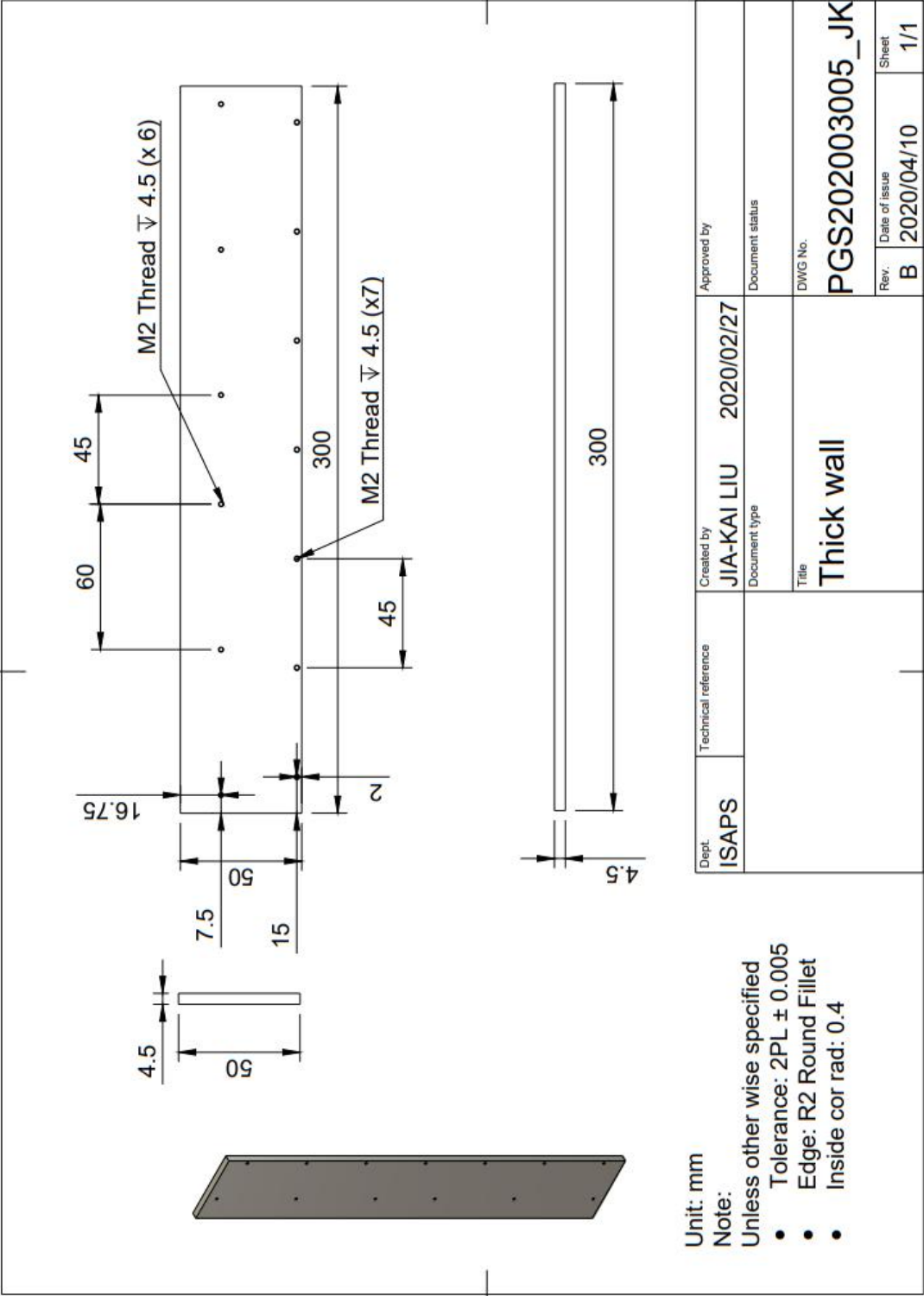
Parts List				
Item	Qty	Part Number	Description	Material
1	1	PGS202003002	Base A	Stainless Steel
2	2	PGS202003003	L frame	Stainless Steel
3	1	PGS202003004	Thin wall	Stainless Steel
4	1	PGS202003005	Thick wall	Stainless Steel
5	1	PGS202003006	Bridge	Stainless Steel
6	1	PGS202003007	Base B	Stainless Steel
7	1	PGS202003008	Back	Stainless Steel
8	6		M2 5 mm	Stainless Steel
9	14		M2 10 mm	Stainless Steel
10	7		M2 12 mm	Stainless Steel
11	4		M3 18 mm	Stainless Steel
12	6		M2 7 mm	Stainless Steel

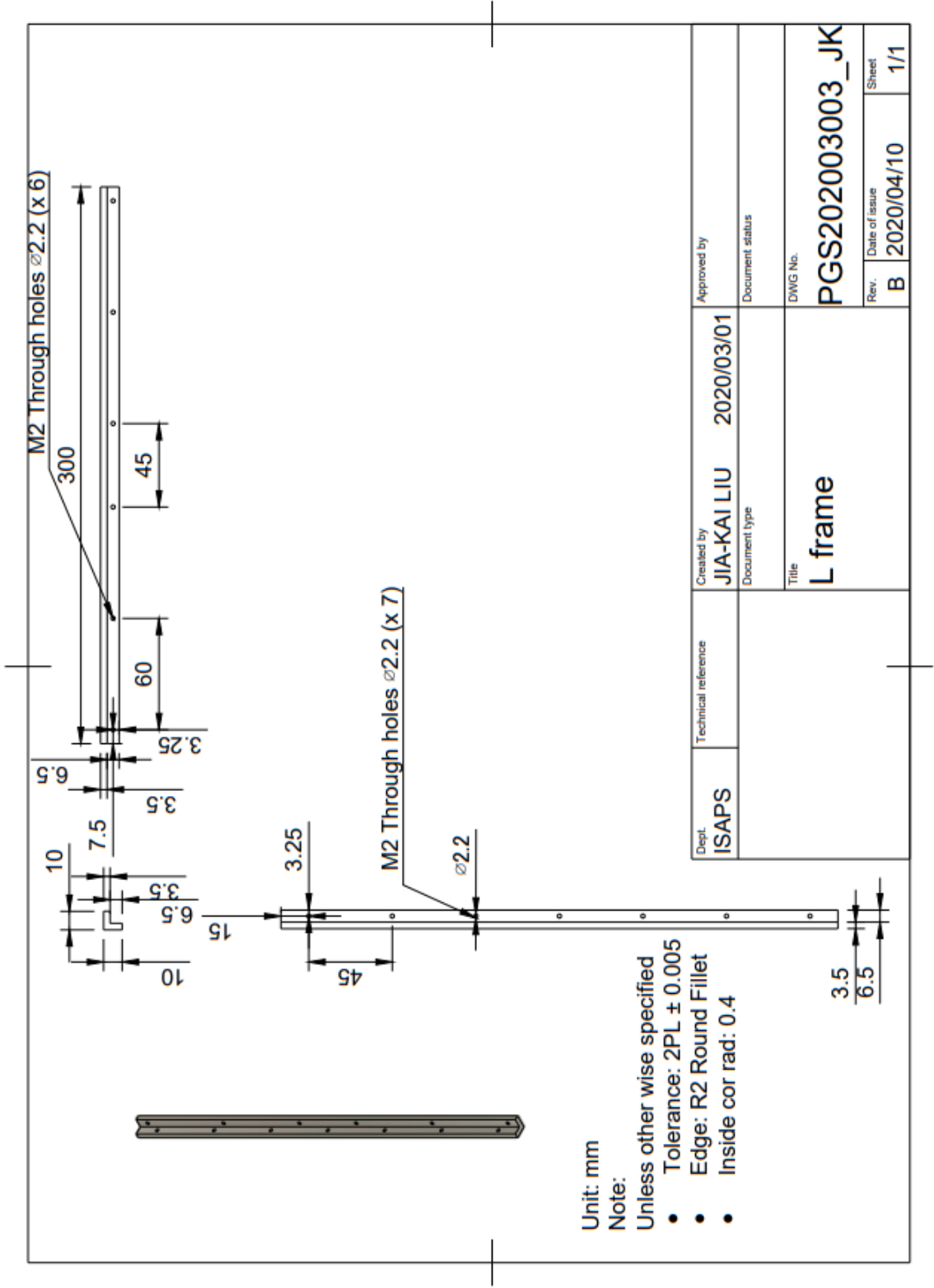
Dept. ISAPS	Technical reference	Created by JIA-KAI LIU	2020/2/25	Approved by
		Document type		Document status
		Title	DWG No. PGS202003001_JK	
		Electrode Spacer		Rev. B
			Date of issue 2020/04/10	Sheet 2/2

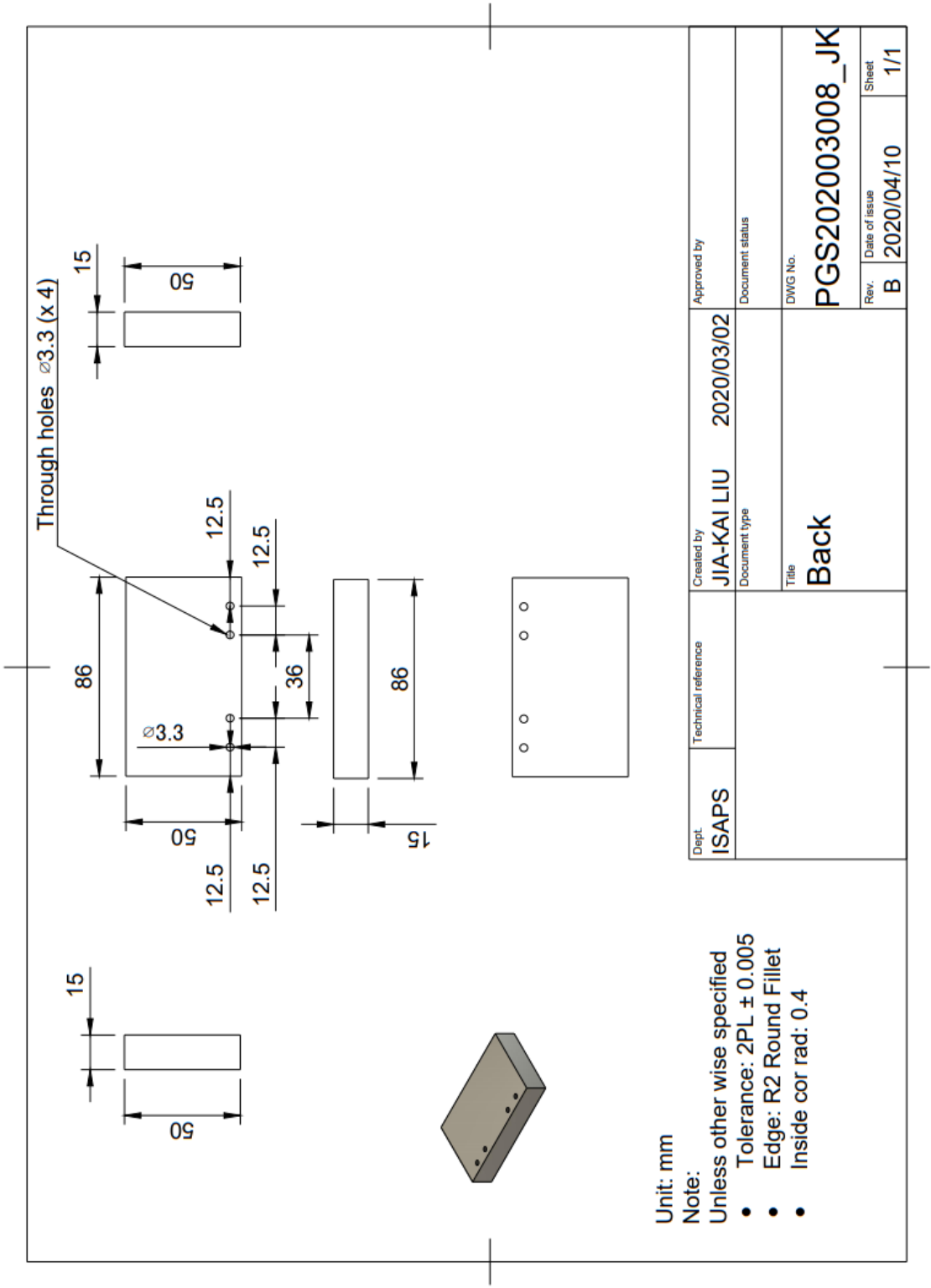


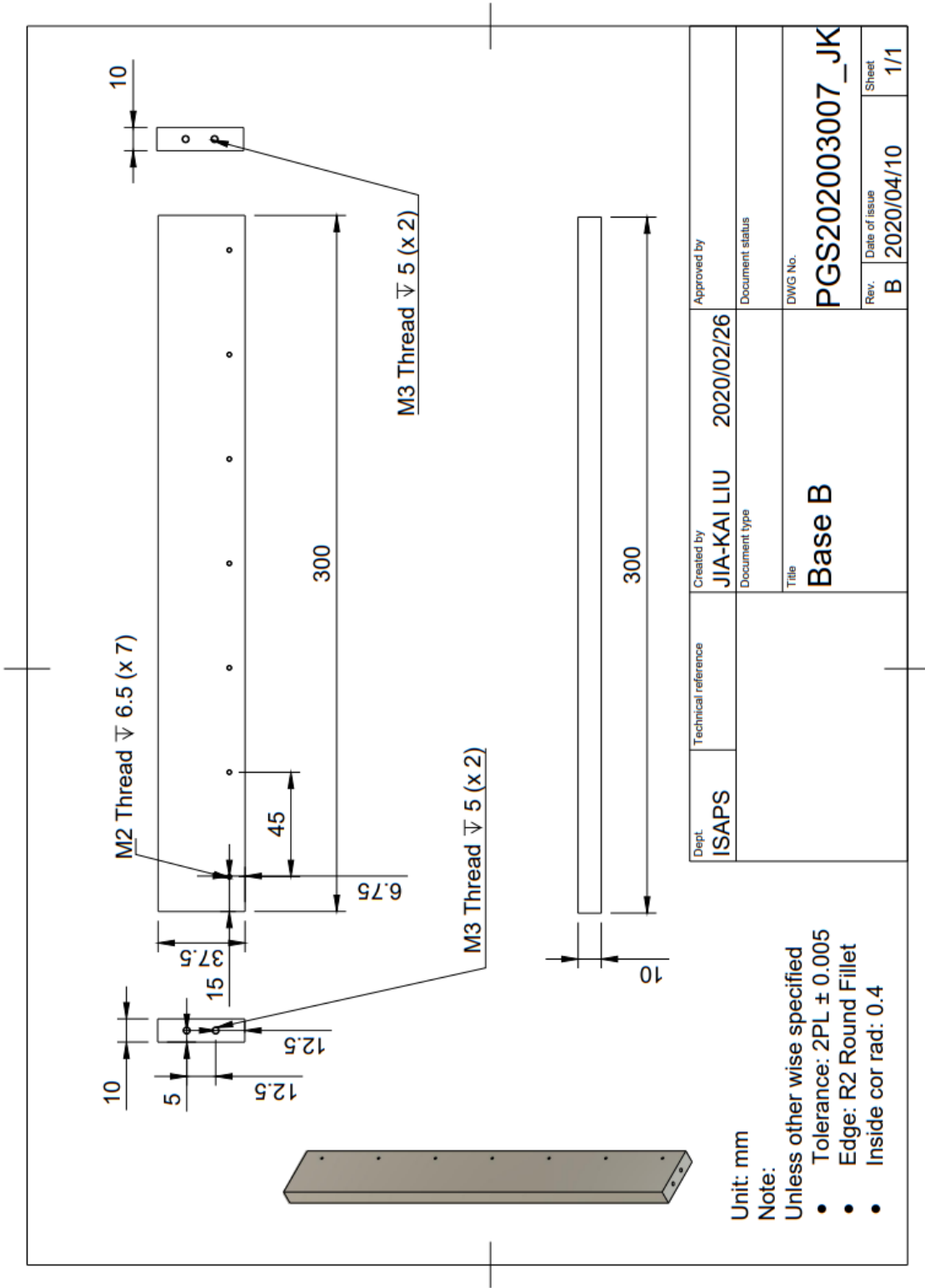


Dept. ISAPS	Technical reference	Created by JIA-KAI LIU	2020/02/27	Approved by
		Document type		Document status
		Title	DWG No.	
		Bridge	PGS202003006_JK	
		Rev.	B	Date of issue
		2020/04/10		Sheet
				1/1









Rogowski coil

