

MATTEO RIGATO

PROGETTAZIONE DI UNA
SORGENTE HOLLOW CATHODE PER
CALIBRAZIONE DI
STRUMENTAZIONE SPAZIALE
NELL'ESTREMO ULTRAVIOLETTO

TESI DI LAUREA TRIENNALE



Relatore: Prof.ssa M.G. Pelizzo
Co-relatore: Dott.ssa P. Zuppella

Università degli Studi di Padova
Facoltà di Ingegneria
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica
31 Marzo 2011

Matteo Rigato: *progettazione di una sorgente hollow cathode per calibrazione di strumentazione spaziale nell'estremo ultravioletto*, Tesi di laurea triennale, © 31 marzo 2011.

INDICE

0.1	Phebus	1
1	Principi fisici dei plasmi	5
1.1	Caratterizzazione dei plasmi	6
1.1.1	Lunghezza di Debye	7
1.1.2	Frequenza di plasma	7
1.1.3	Curve di Paschen	8
1.2	Plasmi a scarica	8
1.2.1	Zona catodica oscura	9
1.2.2	Bagliore negativo	10
1.2.3	Zona dell'anodo	10
1.2.4	Resistività di un gas ionizzato	10
1.3	Scariche di tipo hollow cathode	11
1.4	Altri tipi di plasma a scarica	12
1.4.1	Plasma a scarica a pressione atmosferica	12
1.4.2	Scariche a barriera dielettrica	12
1.4.3	Scarica a corona	12
2	Alimentatori AC/DC	15
2.1	Alimentatori con trasformatore all'ingresso	16
2.2	Alimentatori a commutazione	17
2.3	Analisi dell'alimentatore Glassman PS/PG001R1A-220	18
2.3.1	Amplificatore della tensione di feedback, sua gestione e monitoraggio della tensione di uscita	20
2.3.2	Amplificatore della corrente di feedback, sua gestione e monitoraggio della corrente di uscita	21
2.3.3	Modulazione PWM	22
2.3.4	Regolazione della tensione	22
2.3.5	Regolazione della corrente	23
2.3.6	Moltiplicatore finale	23
3	Progettazione della sorgente	27
3.1	Altre lampade hollow cathode	27
3.2	Struttura generale dello strumento	29
3.3	Miglioramenti meccanici e nuove parti realizzate	30
3.3.1	Catodo	31
3.3.2	Anodi e loro alloggiamenti	32
3.3.3	Flange di chiusura	32
3.3.4	Prigionieri	34
3.4	Immissione del gas	34
3.5	Sistema di raffreddamento	36
4	Test e misure	39
4.1	Facility a incidenza normale	39
4.1.1	Sistema di controllo della pressione	40
4.2	Test effettuati	41
4.3	Spettro di emissione del Neon realizzato con la nuova lampada hollow cathode	42

5	Conclusioni	47
A	Disegni del nuovo progetto	49
B	Disegni del vecchio progetto	63
C	Data sheet dei componenti impiegati	75
	c.1 Alimentatore	75
	BIBLIOGRAFIA	81

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Le stazioni spaziali MPO e MMO attorno a Mercurio.	2
Figura 2	Nella figura in alto: struttura dello spettrometro Phebus a bordo di MPO. Nella figura in basso: schema dei componenti ottici di Phebus. La luce entrante è prima riflessa dallo specchio parabolico fuori asse e successivamente passa attraverso la fessura che la indirizza verso i due grating, uno per EUV e l'altro per FUV. Da questi ultimi entra infine nei rispettivi rilevatori [Chassefière E., 2008].	3
Figura 3	Processo di generazione del plasma a scarica	8
Figura 4	Diagrammi delle regioni spaziali presenti in una scarica DC	9
Figura 5	Rappresentazione di scarica a pressione atmosferica	12
Figura 6	Schema generale di alimentatore con trasformatore all'ingresso. [Malesani L., 2006]	16
Figura 7	Dall'alto: raddrizzatore con configurazione a singola seminonda e raddrizzatore a ponte di Graetz. [Malesani L., 2006]	16
Figura 8	Alimentatore con convertitore CC/CC con trasformatore: (a) schema generale, (b) alimentatore con convertitore Push-pull [Malesani L., 2006]	17
Figura 9	Schema a blocchi dell'alimentatore preso da [Gla, 1984]	20
Figura 10	Schema di principio di come avviene prelevata e gestita la tensione di uscita dell'alimentatore [Gla, 1984]	21
Figura 11	L'amplificatore di figura permette la gestione della corrente di feedback [Gla, 1984]	22
Figura 12	Schema di principio di funzionamento del controllo di tensione [Gla, 1984]	23
Figura 13	Schema di principio del controllo di corrente [Gla, 1984]	23
Figura 14	Schema di principio del moltiplicatore di tensione in uscita per la configurazione Cockroft-Walton [Gla, 1984]	24
Figura 15	HCL di <i>McPherson</i> .	28
Figura 16	Sezione della lampada a scarica capillare.	29
Figura 17	Disegno 3d della nuova lampada realizzato con Autodesk Inventor 2011.	30

Figura 18	Catodo con i quattro tubi per il raffreddamento saldati e avvolti col nastro isolante. Si possono notare la saldatura attorno al cilindro centrale, l'o-ring per tenere il vuoto con il vetrino in pyrex e il foro filettato per l'attacco dell'alimentazione. 31
Figura 19	Catodo 32
Figura 20	aa 33
Figura 21	Alloggiamento dei coni prima e dopo la saldatura. 33
Figura 22	Coni dell'anodo con fori per le viti che li attaccano ai loro rispettivi alloggiamenti. 34
Figura 23	Flangia con foro per tubo per misurazione della pressione interna. 34
Figura 24	Flangia esterna di uscita della radiazione. 35
Figura 25	Confronto visivo tra vecchia e nuova flangia finale. 35
Figura 26	Vista esplosa della valvola a spillo. I numeri nei tondini della figura indicano: 1 dado filtro, 2 filtro, 3 alloggiamento valvola, 4 alloggiamento per l'o-ring per la valvola, 5 corpo della valvola, 6 alloggiamento per l'o-ring per la valvola (nel corpo della valvola), 7 rondella di tenuta, 8 ago, 9 spillo, 10 molla, 11 rondella, 12 filtro, 13 dado filtro, 14 sostegno per gradazione, 15 vite, 16 gradazione, 17 rondella, 18 regolatore, 19 rondella, 20 vite, 21 cappuccio e 22 foro di pannello di montaggio. 36
Figura 27	Particolare del rubinetto di ingresso. Il tubo tigrato entra nel ripartitore idraulico che divide il flusso d'acqua in quattro. I due rubinetti sono messi per poter meglio gestire il flusso di acqua entrante nel catodo. 37
Figura 28	Raccordo per i tubi dell'acqua di uscita dalla lampada nel tubo tigrato. 37
Figura 29	Struttura della facility EUV a incidenza normale [A.J., 2010] e [M., 2010]. 39
Figura 30	Schematico del CEM preso da [CEM, 2002]. 40
Figura 31	Lampada hollow cathode spenta. 42
Figura 32	Lampada accesa con canale di plasma non ancora formato. 43
Figura 33	Lampada accesa con canale di plasma formato. 43
Figura 34	Spettro ideale di emissione del Neon preso da [NIS, 2010]. 44
Figura 35	Spettro di emissione del Neon in scala semplice. 44
Figura 36	Spettro di emissione del Neon in scala semilogaritmica. 45
Figura 37	Catodo centrale. Da notare come il cilindro sia composto da un pezzo unico. 50
Figura 38	Alloggiamento per catodo con fori per i quattro tubi corti. 51

Figura 39	Profilo dell'alloggiamento per catodo con tubi per raffreddamento saldati. 52
Figura 40	Sezione dell'alloggiamento per catodo con tubi montati. 53
Figura 41	Tubo corto con vite Swagelok per poter immettere il tubo del raffreddamento a acqua. 53
Figura 42	Tubo lungo con vite Swagelok per poter immettere il tubo del raffreddamento a acqua. 54
Figura 43	Alloggiamento per anodo con due fori per raffreddamento e uno per immissione gas. 54
Figura 44	Alloggiamento per anodo con due fori per raffreddamento. 55
Figura 45	Flangia di chiusura per l'alloggiamenti degli anodi. 56
Figura 46	Cono che fa da ugello dell'anodo per limitare e convogliare la scarica e il gas. 57
Figura 47	Cono che fa da ugello dell'anodo per limitare e convogliare ulteriormente la scarica e il gas. 58
Figura 48	Tubo dritto per l'immissione dell'acqua di raffreddamento negli alloggiamento degli anodi. 59
Figura 49	Flangia di chiusura della lampada con alloggio per tubo per misuratore di pressione. 60
Figura 50	Flangia di chiusura per l'uscita della radiazione. 61
Figura 51	Prigionieri per fissaggio della lampada. Uniscono le due flange di chiusura. 62
Figura 52	Sezione generale della vecchia lampada hollow cathode. 64
Figura 53	Parte interna in acciaio inox del catodo saldata nell'alloggiamento previsto dal pezzo 2. 65
Figura 54	Parte esterna in acciaio inox del catodo, nella cavità centrale è previsto l'alloggiamento per il pezzo 1. 65
Figura 55	Alloggiamento del catodo. Si notano le coppie di tubi di andata e ritorno per l'acqua, l'alloggiamento per o-ring e vetrino in pyrex. 66
Figura 56	Flangia raffreddata con gli alloggiamenti per l'anodo, l'oring. Da saldare al pezzo 5. 67
Figura 57	Flangia di chiusura da saldare sul pezzo 3. 68
Figura 58	Flangia raffreddata con gli alloggiamenti per l'anodo, l'oring e l'immissione del gas. Da saldare al pezzo 4. 69
Figura 59	Flangia di chiusura da saldare sul pezzo 4. 70
Figura 60	Anodo da montare sul rispettivo alloggiamento. Da notare la seghettature interna vicino al pinhole per migliorare la realizzazione in fase di fresatura. Da montare nella parte posteriore dell'alloggiamento per limitare la scarica. 70
Figura 61	Cono dell'anodo da montare nella parte anteriore dell'alloggiamento rivolta verso il catodo. 71
Figura 62	Flangia di chiusura con alloggiamento oring per il posizionamento della finestra di vetro. 71

Figura 63	Terzo ugello posto nella camera rivolta verso l'uscita. In pratica questo componente non è mai impiegato. 72
Figura 64	Flangia di raccordo per l'uscita della radiazione. 72
Figura 65	Camera di raccordo tra la flangia finale e l'alloggiamento dell'anodo. Sono presenti dei fori per le flange di raccordo. 73
Figura 66	Flangia di raccordo inserita nell'apposto spazio nella camera. 74
Figura 67	Flangia di raccordo inserita nell'apposto spazio nella camera. 74
Figura 68	Schema generale dell'alimentatore presente in laboratorio. È composto dal master a sinistra al quale è collegato lo slave. [Gla, 1984] 77
Figura 69	Rappresentazione schematica del master dell'alimentatore. Lo slave è connesso al master attraverso i due cavi <i>hv output</i> [Gla, 1984] 78

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Strumentazione all'interno di MPO e MMO presi da [ESA, 2010]. 1
Tabella 2	Esempi di plasmi naturali e da laboratorio 6
Tabella 3	Principali applicazioni dell'alimentatore impiegato 19

INTRODUZIONE

Il motivo per cui è stata realizzata la sorgente, è poter calibrare la strumentazione ottica presente all'interno del spettrometro *Phebus*, contenuto nella missione spaziale *Bepi Colombo* che partirà nel 2014 per esplorare Mercurio.

Questa missione impegnerà l'Agenzia Spaziale Europea, ESA [ESA, 2010], in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Giapponese, ASG, e studierà:

- la superficie, la forma, l'interno e la struttura del pianeta;
- la sua origine e l'evoluzione, dato che è il pianeta più vicino al Sole;
- la composizione e la dinamica della sua esosfera;
- la struttura e la dinamica della magnetosfera;
- l'origine del campo magnetico di Mercurio;
- la composizione e l'origine dei depositi polari;
- il test sulla teoria generale della relatività di Einstein.

Saranno lanciati due veicoli spaziali: il primo dell'ESA il *Mercury Planetary Orbiter* (MPO) e il *Mercury Magnetospheric Orbiter* (MMO) dell'ASG. Il primo si occuperà di analizzare la superficie e l'interno del pianeta mentre il secondo la regione attorno al pianeta. Gli strumenti presenti nelle due piattaforme sono riportati in tabella 1.

MPO	telecamere, spettrometri (IR, UV, raggi X, raggi γ , neutroni), radiometro, laser altimetrico, magnetometro, analizzatori di particelle, transponder Ka-band, accelerometro
MMO	magnetometro, spettrometro ionico, analizzatore di energia elettronico, rilevatore di plasma energetico e freddo, analizzatore di onde di plasma

Tabella 1: Strumentazione all'interno di MPO e MMO presi da [ESA, 2010].

0.1 PHEBUS

Phebus è l'acronimo di *Probing of Hermean Exosphere By Ultraviolet*

Realizzare una nuova sorgente per calibrare PHEBUS

Lo spettrometro Phebus

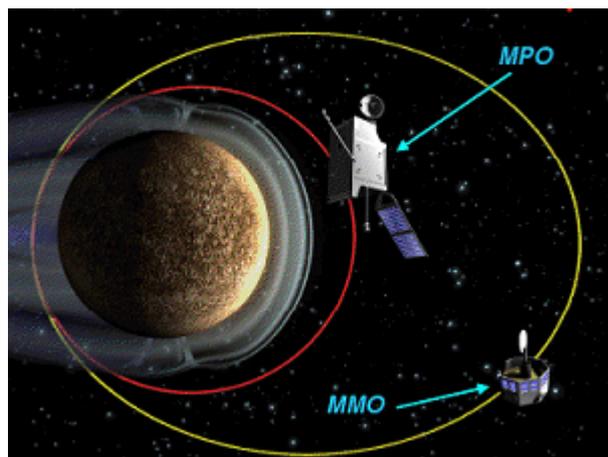


Figura 1: Le stazioni spaziali MPO e MMO attorno a Mercurio.

let *Spectroscopy* (esplorazione dell'esosfera Hermean con spettrografo a ultravioletti,) è lo spettrometro presente in MPO che lavora nelle lunghezze d'onda dell'ultravioletto tra i 55 e i 315nm. L'estremo ultravioletto (EUV) copre l'intervallo $55 \div 155\text{nm}$, mentre il lontano ultravioletto (FUV) i $145 \div 315\text{nm}$.

Obiettivi di Phebus

Lo spettrometro è uno strumento che serve per misurare determinate porzioni dello spettro della radiazione elettromagnetica, decomponendola, nelle sue lunghezze d'onda. L'obiettivo principale di Phebus è spiegare che interazione c'è tra superficie, esosfera e magnetosfera di Mercurio. Attraverso questo strumento perciò, si potrà capire che materiali e atomi effettivamente compongono Mercurio, se sono metalli, se è presente una percentuale significativa di particelle libere, se la materia si trova allo stato di ioni oppure di atomi o molecole, scoprire se vi sono rivestimenti superficiali di ghiaccio nelle regioni d'ombra o regioni con crateri. Altre informazioni che si potranno ricavare dai dati riguarderanno l'esosfera del pianeta e la sua struttura la densità dei vari livelli in varie posizioni durante l'orbita attorno al Sole. Siccome la rilevazione dello spettro è ottenuta con il metodo del conteggio dei fotoni, sono impiegati dei fotorilevatori [Chassefière E., 2008] dove il fotocatodo è direttamente in contatto con i fotoni.

La struttura di Phebus è riportata in figura 2. Lo strumento impiega due reticoli di diffrazione e due rilevatori. In fase di progettazione si è cercato il compromesso tra risoluzione spettrale e prestazioni fotometriche. Le prime infatti dovranno avere una risoluzione di 1nm per l'EUV e 1.5nm per il FUV [Chassefière E., 2008].

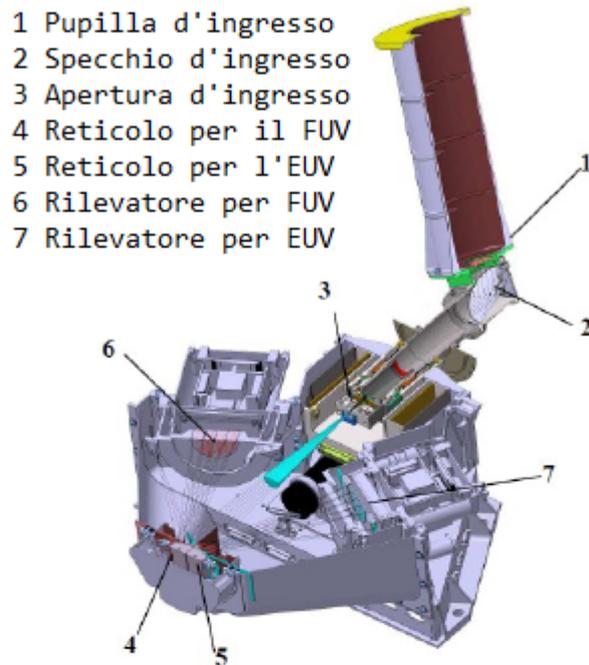
Suddivisione del lavoro nei vari capitoli della tesi

L'esposizione del lavoro è articolata come segue:

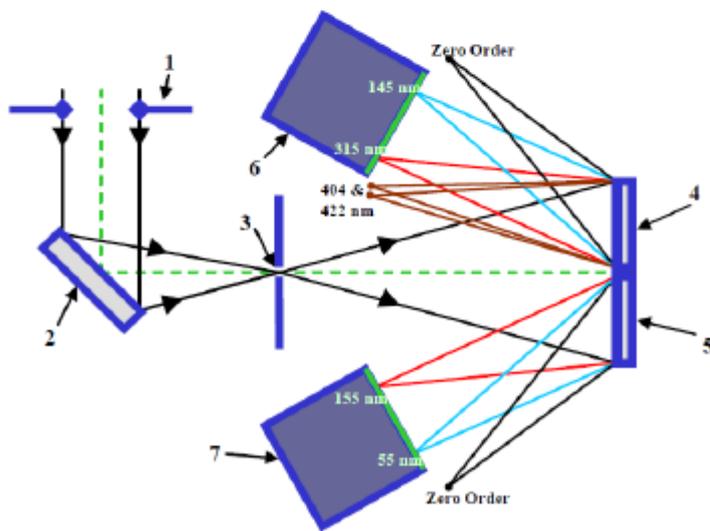
NEL PRIMO CAPITOLO viene offerta una breve panoramica sulla fisica dei plasm, con particolare attenzione posta su quelli a scarica.

NEL SECONDO CAPITOLO si analizza l'alimentatore presente in laboratorio che fornisce potenza alla lampada.

NEL TERZO CAPITOLO sono illustrate le scelte progettuali, com'è fatto lo strumento, i componenti acquistati, come avviene il raffreddamento e le scelte prese in fase di progettazione.



Sezione meccanica di Phebus



Schema ottico di Phebus

Figura 2: Nella figura in alto: struttura dello spettrometro Phebus a bordo di MPO. Nella figura in basso: schema dei componenti ottici di Phebus. La luce entrante è prima riflessa dallo specchio parabolico fuori asse e successivamente passa attraverso la fessura che la indirizza verso i due grating, uno per EUV e l'altro per FUV. Da questi ultimi entra infine nei rispettivi rilevatori [Chassefière E., 2008].

4 | Elenco delle tabelle

NEL QUARTO CAPITOLO sono presenti i risultati dei test e come sono stati effettuati in laboratorio.

NEL QUINTO CAPITOLO saranno tratte le conclusioni finali del lavoro svolto in questi mesi.

NELL'APPENDICE A sono mostrati i disegni del nuovo progetto.

NELL'APPENDICE B sono collocati quelli del precedente progetto.

NELL'APPENDICE C sono riportati i data-sheet dei componenti piú significativi che permettono l'uso della lampada.

Padova, 31 marzo 2011

M. R.

1

PRINCIPI FISICI DEI PLASMI

INDICE

1.1	Caratterizzazione dei plasmi	6
1.1.1	Lunghezza di Debye	7
1.1.2	Frequenza di plasma	7
1.1.3	Curve di Paschen	8
1.2	Plasmi a scarica	8
1.2.1	Zona catodica oscura	9
1.2.2	Bagliore negativo	10
1.2.3	Zona dell'anodo	10
1.2.4	Resistività di un gas ionizzato	10
1.3	Scariche di tipo hollow cathode	11
1.4	Altri tipi di plasma a scarica	12
1.4.1	Plasma a scarica a pressione atmosferica	12
1.4.2	Scariche a barriera dielettrica	12
1.4.3	Scarica a corona	12

Per capire i processi che avvengono all'interno della lampada hollow cathode, è necessario comprendere cosa sono e come si comportano i plasmi. Un maggior rilievo sarà posto su quelli a scarica a bagliore (*glow discharge plasma*) che sono impiegati nella generazione di spettri di emissione nell'estremo UV in vuoto (*Vacuum UltraViolet*).

La prima cosa da definire è che cosa si intende con la parola *plasma*. Un plasma è un gas ionizzato. Un gas è *ionizzato* quando la maggior parte degli atomi che lo compongono ha perso degli elettroni, i quali sono liberi di muoversi. Perciò la condizione necessaria di partenza è che il materiale che si vuole impiegare, sia nello stato gassoso. La separazione delle cariche e il loro movimento sono causa di campi elettrici e di un flusso di corrente aggiuntivi. Quest'ultimo poi genera un campo magnetico. La continua separazione delle cariche unita a questi ultimi effetti, provoca ancora ioni in un processo a valanga. Si può capire sin da ora come lo studio dei plasmi sia composto da una varietà di processi legati tra loro che interagiscono.

Definizione di plasma

Le stelle contengono la maggior quantità di plasma presente nell'universo. È anche possibile, però, produrlo artificialmente in laboratorio applicando ad un gas, rinchiuso in un apposito contenitore sotto particolari condizioni, o un campo elettrico o una corrente. Le temperature che il plasma può raggiungere vanno dai 100 K fino ai 10^8 K circa [Goldston J., 1995].

Plasmi in natura e prodotti artificialmente

Una classificazione dei plasmi da laboratorio può essere fatta in base alla temperatura. Ci sono i plasmi ad alta temperatura per fusione e quelli a bassa temperatura da scarica di gas. I plasmi da scarica a gas si possono suddividere in base al modo in cui sono prodotti: a scarica a bagliore (*glow discharge plasma GD*), da accoppiamento in-

Classificazione dei plasmi da laboratorio

duttivo (*inductively coupled plasma* ICP) e da induzione a microonde (*microwave-induced plasma* MIP).

Nel seguito verrà posta particolare attenzione ai plasmi a scarica a bagliore (d'ora in avanti chiamati semplicemente a scarica) in quanto è il tipo di plasma alla base del funzionamento della hollow cathode.

1.1 CARATTERIZZAZIONE DEI PLASMI

*Parametri di
caratterizzazione
fondamentali*

I parametri di caratterizzazione di un plasma sono vari ma ce ne sono due di fondamentali:

1. la *densità elettronica* n_e misurata in m^{-3} e
2. la *temperatura elettronica* T_e in K o in eV, dove $1\text{eV} = 11600\text{K}$.

Misurare questi due parametri separatamente è difficile, quello che si può fare, è determinarne uno sotto certe condizioni, e poi successivamente l'altro [H.R., 1995].

*Parametri di
caratterizzazione
secondari*

Altri parametri importanti sono:

- la *resistività* η misurata in $\Omega \cdot \text{m}^{-2}$,
- la *lunghezza di Debye* λ_D in D,
- il prodotto *pressione-lunghezza della scarica* pD nei plasmi a scarica,
- i *campi elettromagnetici* e la loro evoluzione nel tempo,
- la *frequenza del plasma* f in Hz,
- la *velocità termica* v_t .

	n_e [m^{-3}]	T_e [eV]
Gas interstellare	10^6	1
Vento solare	10^7	10
Ionosfera terrestre	10^{11}	10^{-1}
Scariche a gas	10^{18}	2
Plasmi di processo	10^{18}	10^2
Esperimenti di fusione	$10^{19} \div 10^{20}$	$10^3 \div 10^4$
Reattore di fusione	10^{20}	10^4

Tabella 2: Esempi di plasmi naturali e da laboratorio presi da [Goldston J., 1995].

Si deve fare una precisazione riguardante l'unità di misura della temperatura elettronica. In fisica dei plasmi si tende a far uso dell'eV anziché dei K in quanto temperatura del plasma e energia sono legati direttamente. Per poter avere un'ordine di grandezza e poter confrontare i parametri fondamentali dei plasmi, si osservi la tabella 1. Come si può notare, i maggiori valori di n_e e T_e sono nei plasmi da laboratorio e non in quelli naturali.

1.1.1 Lunghezza di Debye

Si consideri ora un plasma che abbia queste caratteristiche:

- sia in equilibrio termodinamico;
- si trovi a temperatura costante ovunque;
- abbia una distribuzione spaziale uniforme;
- gli ioni positivi abbiano carica pari a Z_e ;
- la densità degli ioni, n_i , coincida con quella degli elettroni n_e .

Allora si definisce come λ_D la lunghezza di Debye che indica la distanza entro la quale c'è una separazione di carica apprezzabile in quanto le cariche elettriche presenti dentro, schermano il campo elettrico generato dalle altre cariche del plasma e non interagiscono con esse. Questo parametro vale:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{n_e e^2 (1 + Z T_e / T_i)}} \quad (1.1)$$

dove ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto, e è la carica di un elettrone, Z il numero di cariche presenti in uno ione positivo e T_i la temperatura dello ione. Di solito però si trascura il termine ionico così la formula si riduce a:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{n_e e^2}} \quad (1.2)$$

1.1.2 Frequenza di plasma

La frequenza di plasma è un parametro importante quando si lavora con plasmi a scarica accoppiati capacitivamente in radiofrequenza. Questo tipo di plasmi è generato da una tensione alternata, di solito a 13.56 MHz [Bogaerts A., 2001], applicata a due elettrodi che contengono il plasma, che fungono da condensatore. Solo uno dei due elettrodi è conduttivo, infatti applicandogli una tensione alternata, può comportarsi da anodo o catodo in alternanza. Il campo elettrico alternato produce delle oscillazioni degli elettroni se ha una frequenza minore della frequenza di plasma, la quale si ottiene dalla seguente formula per la pulsazione:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (1.3)$$

che diventa in Hz:

$$f_{pe} = \frac{\omega_{pe}}{2\pi} = 9000 \sqrt{n_e} \quad (1.4)$$

dove n_e in questo caso ha la dimensione di cm^{-3} .

Valori tipici di f_{pe} sono superiori o uguali ai 13.56 MHz e sono scelti tenendo conto che il periodo di oscillazione deve essere minore del tempo necessario all'elettrodo non conduttivo per caricarsi. Si deve anche tenere conto che la frequenza non deve disturbare i dispositivi per le telecomunicazioni.

*Interazione tra i
campo elettrici
all'interno di un
plasma*

*Plasmi a scarica
accoppiati
capacitivamente in
radiofrequenza*

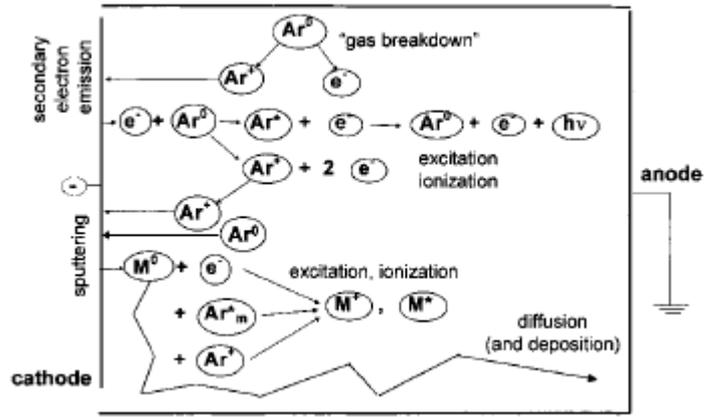


Figura 3: Processo di generazione del plasma a scarica su atomi di Argon.

1.1.3 Curve di Paschen

Tensione di innesco della scarica

Le curve di Paschen sono delle funzioni che esprimono la *tensione di innesco* o di *breakdown* da fornire al gas per portarlo allo stato di plasma in funzione del prodotto tra la lunghezza della scarica e la pressione del gas. L'equazione che descrive una curva di Paschen per un determinato gas, è:

$$V_b = \frac{Bpd}{\log Apd - \log \log (1 + \frac{1}{\gamma})} \tag{1.5}$$

dove p indica la pressione, d la lunghezza della scarica.

1.2 PLASMI A SCARICA

Tensione di innesco (o breakdown) Processo di generazione del plasma da scarica elettrica

Il modo più semplice per generare un plasma da un gas è quello di applicare un'alta tensione costante agli elettrodi del contenitore che lo racchiudono. Questo è proprio ciò che avviene anche nella hollow cathode.

A causa dell'alta differenza di potenziale (nell'ordine delle centinaia di Volt, calcolata attraverso la curva di Paschen chiamata *tensione di breakdown* V_b), il gas viene un po' alla volta ionizzato: gli ioni positivi provocano l'emissione di altri elettroni sul catodo chiamata *emissione secondaria*, mentre gli elettroni, a ulteriori collisioni nel plasma seguite da *eccitazione* e *ionizzazione*. Se l'urto tra molecole implica eccitazione, allora seguirà anche una diseccitazione con la conseguente emissione di radiazione elettromagnetica; se invece determina una ionizzazione, i nuovi ioni creati potranno dare origine ad ulteriori urti con altri atomi continuando il processo. L'evoluzione temporale del processo provocherà una corrente costante, che scorre tra anodo e catodo, e che, se necessario, può essere regolata ad esempio attraverso l'alimentatore. Una conseguenza di questo processo è il fenomeno dello *sputtering*.

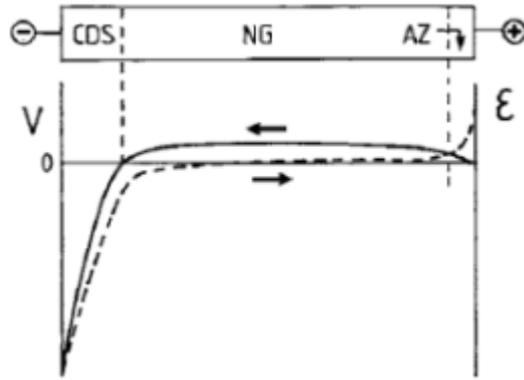


Figura 4: Diagrammi delle regioni spaziali presenti in una scarica DC dove CDS = cathode dark space, NG = negative glow, AZ = anode zone. La linea continua indica il valore della tensione mentre quella tratteggiata il campo elettrico Bogaerts A. [2001]

Una parte degli ioni formati, vanno a colpire il catodo che rilascia elettroni (fenomeno di emissione secondaria) ma anche atomi del materiale di cui è costituito. Questi ultimi, a loro volta, interagiscono con gli altri atomi potendoli ionizzare, ionizzandosi ed emettendo radiazioni.

Si è parlato fin'ora di plasmi a scarica originati da una corrente DC o AC. Questi però non sono gli unici modi per fornire potenza ad un plasma, si può ad esempio anche applicare degli impulsi elettrici. La durata è nell'ordine dei μs o ms con tensione massima nell'ordine dei kV . Condizioni tipiche per operare in questo modo sono: tensione massima $V_{\text{max}} = 2 \text{ kV}$, corrente $I = 1 \text{ A}$, durata dell'impulso $t_{\text{on}} = 10 \mu\text{s}$ e frequenza di ripetizione dell'impulso $f_{\text{rep}} = 200 \text{ Hz}$ [Bogaerts A., 2001]. In figura 4 è presente il grafico di tensione e campo elettrico per un plasma a scarica DC. Si nota come si può dividere l'estensione della scarica in tre zone in base ai valori di campo elettrico e tensione. Ognuna delle aree in cui è suddivisa la scarica, è spiegata nei prossimi sottoparagrafi.

Altri modi per generare un plasma in laboratorio

Suddivisione spaziale della scarica

1.2.1 Zona catodica oscura

La prima regione della figura da sinistra è chiamata *zona catodica oscura* che termina dove la tensione si annulla. In questa regione gli elettroni escono dal catodo accelerati dalla grande caduta di tensione. Il campo elettrico rimane sempre negativo seguendo l'andamento della tensione. Siccome è la zona a maggior energia, è qui che avviene il maggior numero di collisioni tra atomi, ioni e elettroni e dove avviene il processo di ionizzazione a valanga [Alberts I.L., 2010]. La densità di corrente presente in questa regione è data dalla formula

$$\frac{j}{p^2} = \frac{kV^{3/2}}{pd^{5/2}} \quad (1.6)$$

dove p è la pressione e d l'estensione della zona catodica oscura [Alberts I.L., 2010], [Little P.F., 1954]. Si nota come j decresca all'aumentare di d a

causa delle ricombinazioni tra ioni e elettroni. Oltre a questa densità di corrente vi è anche un contributo dato dal gradiente di diffusione degli elettroni, che come è stato detto, sono in maggior quantità nelle vicinanze del catodo

$$j_e = qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (1.7)$$

in cui q è la carica di un elettrone pari a $-1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ e D_n la mobilità degli elettroni che varia in base alla specie atomica. Gli altri elettroni presenti in questa zona sono dovuti da collisioni causate dai precedenti, ma avranno meno energia proprio per questo motivo.

1.2.2 Bagliore negativo

La seconda zona presente in figura si chiama *bagliore negativo* o *zona oscura di Faraday* e in essa il campo elettrico è praticamente nullo, mentre la tensione diventa positiva fino a calare verso la fine dove c'è la *zona dell'anodo*. Se nella zona catodica oscura gli elettroni avevano una grande energia dato dal grande potenziale e c'era una forte densità di corrente, nella zona oscura di Faraday il numero di elettroni libero è di molto inferiore a prima, la loro energia diminuita e il plasma è distribuito abbastanza uniformemente. Ad un certo punto però il campo elettrico cresce di poco ma quel tanto che basta per far riaccelerare gli elettroni.

1.2.3 Zona dell'anodo

Si può intuire già dal nome che questa zona sia quella a contatto col catodo. Qui il potenziale si annulla come avviene nella hollow cathode dato che è collegato a massa. La concentrazione di elettroni in movimento è minima e praticamente trascurabile.

1.2.4 Resistività di un gas ionizzato

Il plasma è un buon conduttore elettrico quando si è formato. Infatti, appena si fornisce energia ad un gas per innescare la scarica, esso non si porta subito allo stato di plasma ma solo dopo un transitorio. Si può quindi considerarlo: prima come una resistenza di valore infinito e quando si porta a regime, come una resistenza dell'ordine delle decine di Ω . Quando un gas è passato allo stato di plasma, può essere caratterizzato da una resistività

$$\eta = \frac{\sqrt{2m_e} Z e^2 \ln(\Lambda)}{24\pi^{3/2} \epsilon_0^2 T_e^{3/2}} = 1.03 \cdot 10^{-4} Z \frac{\ln(\Lambda)}{T_e^{3/2}} \quad (1.8)$$

misurata in Ωm [S.K., 1963]. Z indica lo stato di ionizzazione media, $\ln(\Lambda)$ è il logaritmo di Coulomb dato da $\ln(\Lambda) = 23 - \ln(ZN_e^{1/2}/T_e^{3/2})$. Calcolata la resistività, la resistenza R si ottiene mediante:

$$R = \eta \frac{d}{S} \quad (1.9)$$

*Il plasma come
conduttore elettrico*

dove d è l'estensione della colonna di plasma in m e S la sezione in m^2 . Solitamente la resistenza è intorno alle decine di Ω . Per una lampada fluorescente a catodo freddo alimentata a 1kV e 6mA RMS, la resistenza vale infatti 55Ω [Alberts I.L., 2010].

1.3 SCARICHE DI TIPO HOLLOW CATHODE

Le scariche di tipo hollow cathode (catodo cavo) sono usate in molti ambiti: per la generazione di plasma, per la deposizione di film sottili, trattamento di superfici, per l'analisi spettroscopica e per la produzione di fasci di elettroni [Lieberman M.A., 1994].

Cosa sono e a cosa servono

Come dice il nome, la scarica avviene in un cilindro cavo in cui il diametro $2R \ll l$, la lunghezza del cilindro, ha la funzione di catodo quando viene collegato all'alimentazione. Il diametro per questo tipo di cilindri è inferiore a 1cm. Il gas è contenuto all'interno del catodo e la tensione è applicata a tutto il cilindro perchè avvenga la scarica.¹ La scarica necessita l'alto vuoto e la pressione interna non sia paragonabile come ordine di grandezza a quella usata per l'emissione del gas. Gli anodi di solito solo collegati a massa e hanno una forma a disco, a piatto quadrato, a cilindro e a volte possono presentare un foro nel centro delle facce perpendicolari alla scarica per lasciar passare gli elettroni provenienti dal catodo (chiamati anche *elettroni caldi* perchè a maggior energia cinetica proporzionale a $\approx V_{dc}/2$). La distanza tra anodo e catodo deve comunque poter garantire che non si formi la colonna positiva.

Condizioni su pressione e anodi

Per quanto riguarda le linee di campo elettrico tra anodo e catodo si può intuire come vadano dall'interno del catodo all'anodo (in alcuni casi se ce ne sono due, vanno a chiudersi su quello più vicino). Se l'anodo è forato la maggior parte delle linee di campo andranno a chiudersi sulla superficie del bordo del foro.

Linee di campo tra anodo e catodo

Prendendo in considerazione le cariche positive, allora l'equazione di diffusione del plasma è data da

$$J_p = -D_a \frac{1}{r} \left(r \frac{dn_i}{dr} \right) \quad (1.10)$$

dove D_a indica il coefficiente di diffusività dipendente dagli elettroni freddi e n_i densità di ioni. Il flusso di elettroni calcolato alla superficie catodica è dato da:

$$\Gamma_i = \frac{2D_a n_{e0}}{R} \quad (1.11)$$

in cui n_{e0} è la densità degli elettroni a bassa temperatura al centro della scarica. A causa della tensione costante negativa applicata al catodo V_{dc} e della corrente I_{dc} allora

$$I_{dc} = 2\pi l e \Gamma_i = 2\pi l e \cdot 2D_a n_{e0} \quad (1.12)$$

¹ Si faccia attenzione a non avere spigoli troppo marcati perchè causano l'effetto punta sulla scarica.

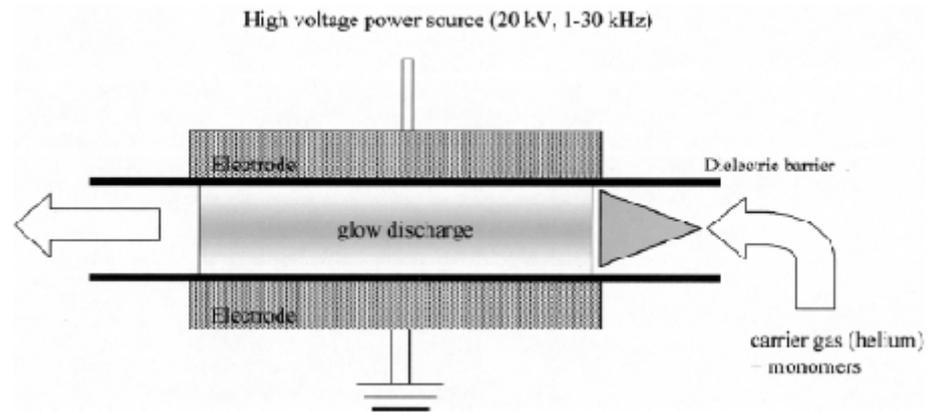


Figura 5: Rappresentazione di scarica a pressione atmosferica

1.4 ALTRI TIPI DI PLASMA A SCARICA

1.4.1 Plasma a scarica a pressione atmosferica

*Plasmi ad alta
pressione*

Fin'ora si sono considerati plasmi a scarica che lavorano a pressioni attorno alle centinaia di Pa, questo però non vieta di aumentare la pressione anche fino a qualche atm. Come si può vedere dalle curve di Paschen, aumentando la pressione è necessario decrementare la lunghezza della scarica a parità di tensione di breakdown. Questo provoca però un aumento della temperatura sulle pareti del contenitore in cui avviene la scarica e con i conseguenti problemi di raffreddamento. Questo tipo di plasma (in inglese *atmospheric glow discharge*) si può ottenere in un catodo cavo con diametri anche dell'ordine delle centinaia di μm . Spesso viene impiegato un materiale dielettrico per ricoprire l'anodo [Bogaerts A., 2001] così bisogna applicare una tensione alternata. Per mantenere una scarica stabile con l'argon, l'ossigeno e l'azoto è necessario cambiare la configurazione degli elettrodi. La configurazione tipica per questo plasma come si vede in figura 5 distanza tra gli elettrodi è di pochi mm, una tensione alternata di decine di 20kV a una frequenza di $1 \div 30\text{kHz}$ [Bogaerts A., 2001].

1.4.2 Scariche a barriera dielettrica

*Filamenti di
microscariche*

Sono simili a quelle a pressione atmosferica. La tensione applicata è alternata e gli elettrodi sono ricoperti da un dielettrico (vetro, quarzo, materiali ceramici o polimeri). Ciò che li differenzia è la scarica che è composta da filamenti di microscariche che durano alcuni ns.

1.4.3 Scarica a corona

*Scarico su filo
elettrico aperto*

Per ottenere una scarica di questo tipo è necessario applicare una tensione a un catodo composto da un pezzo di filo elettrico. Gli elettroni che vi escono, accelerati dalla forte tensione, vanno ad eccitare

in maniera radiale gli atomi attorno al filo dando origine a una scarica luminosa circolare che ha come centro l'estremità del filo.

2

ALIMENTATORI AC/DC

INDICE

2.1	Alimentatori con trasformatore all'ingresso	16
2.2	Alimentatori a commutazione	17
2.3	Analisi dell'alimentatore Glassman PS/PG001R1A-220	18
2.3.1	Amplificatore della tensione di feedback, sua gestione e monitoraggio della tensione di uscita	20
2.3.2	Amplificatore della corrente di feedback, sua gestione e monitoraggio della corrente di uscita	21
2.3.3	Modulazione PWM	22
2.3.4	Regolazione della tensione	22
2.3.5	Regolazione della corrente	23
2.3.6	Moltiplicatore finale	23

Questo capitolo ha la funzione di illustrare brevemente cosa sono gli alimentatori AC/DC e analizzare in particolare quello impiegato nel funzionamento della lampada hollow cathode.

Un alimentatore è un dispositivo elettronico che permette di fornire tensioni e correnti, differenti da quelle di rete, ad altri dispositivi (chiamati anche *carichi*). In Italia la fornitura di elettricità su linee a bassa tensione per piccole utenze prevede:

- una tensione sinusoidale a frequenza di 50Hz;
- tensione nominale di 220V;
- corrente che dipende dal contratto di fornitura.

Dato che questi parametri non vanno bene per ogni applicazione, è necessario trovare un modo per modificare queste caratteristiche in quelle più consone all'applicazione di interesse. Si deve inoltre cercare di non perdere potenza e filtrare quella ottenuta in modo che abbia una bassa impedenza alle variazioni della corrente assorbita dal carico ed alle ondulazioni presenti in essa.

Un'alimentatore AC/DC modifica la tensione di ingresso alternata, che di solito è quella che proviene dalla fornitura elettrica, in una diretta. Questi ultimi, in particolare, sono chiamati *alimentatori regolati* se la tensione di uscita può essere regolata dall'operatore [Malesani L., 2006]. Un'altra categoria di alimentatori è quella degli *alimentatori stabilizzati*, che permettono, con il loro sistema di controllo, di avere una tensione d'uscita che non risente delle variazioni della tensione con cui è alimentata e delle variazioni di corrente sul carico all'uscita. Gli alimentatori che non hanno queste caratteristiche di controllo si dicono *non regolati*. Infine gli *alimentatori a commutazione* hanno al loro interno uno o più convertitori a commutazione e grazie a questi ultimi possono lavorare ad alte frequenze riducendo le dimensioni, controllando

Definizione di alimentatore elettrico

Alimentatore AC/DC

Alimentatori regolati

Alimentatori a commutazione

le correnti di ingresso e diminuendo l'impatto che queste hanno sulla rete.

2.1 ALIMENTATORI CON TRASFORMATORE ALL'INGRESSO

L'introduzione di un trasformatore di ingresso

Si prenda come esempio la figura 6 che illustra lo schema generale di un alimentatore con trasformatore e regolatore a circuito integrato.

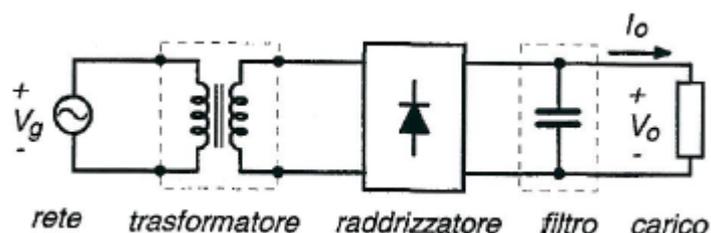


Figura 6: Schema generale di alimentatore con trasformatore all'ingresso. [Malesani L., 2006]

Partendo da sinistra, sono posti incascata un trasformatore, un raddrizzatore a diodi, un condensatore di ingresso C_i e un secondo condensatore che fa da filtro di uscita. Il trasformatore oltre ai vantaggi scritti precedentemente, fa da isolamento tra la linea di rete (schematizzata con il generatore di tensione v_g) e i componenti a valle, e permette una prerogolazione della tensione all'ingresso del raddrizzatore. Quest'ultimo è costituito per la maggior parte delle volte da dei diodi posti in configurazioni tali da raddrizzare la sinusoide al suo ingresso. La più semplice configurazione è quella con un solo diodo chiamata a *singola semionda*. Quella più usata è quella a *ponte di Graetz* che si può osservare in figura 7 in basso.

Raddrizzatori a singola semionda

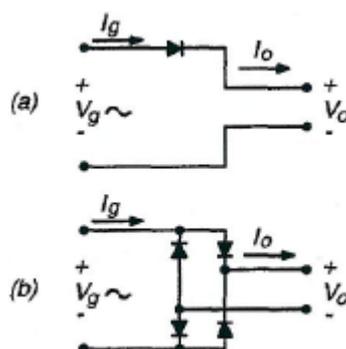


Figura 7: Dall'alto: raddrizzatore con configurazione a singola semionda e raddrizzatore a ponte di Graetz. [Malesani L., 2006]

La particolarità della configurazione a ponte di Graetz è che

$$v_o(t) = |v_g(t)|$$

e di conseguenza non si perde efficienza. Il motivo per cui gli posto successivamente un condensatore, è per poter mantenere una tensione quasi costante da fornire al carico che può essere costituito da un ulteriore convertitore (con o senza trasformatore), da dei filtri d'uscita e infine il carico effettivo da alimentare.

Raddrizzatori a doppia semionda

2.2 ALIMENTATORI A COMMUTAZIONE

Gli alimentatori a commutazione sfruttano i convertitori a commutazione per regolare la tensione di uscita semplicemente variando il *duty cycle*¹ e in base al convertitore utilizzato si può avere una migliore efficienza alle alte o basse potenze. Il tutto non deve compromettere il rendimento che deve rimanere elevato per tutte le tensioni di impiego.

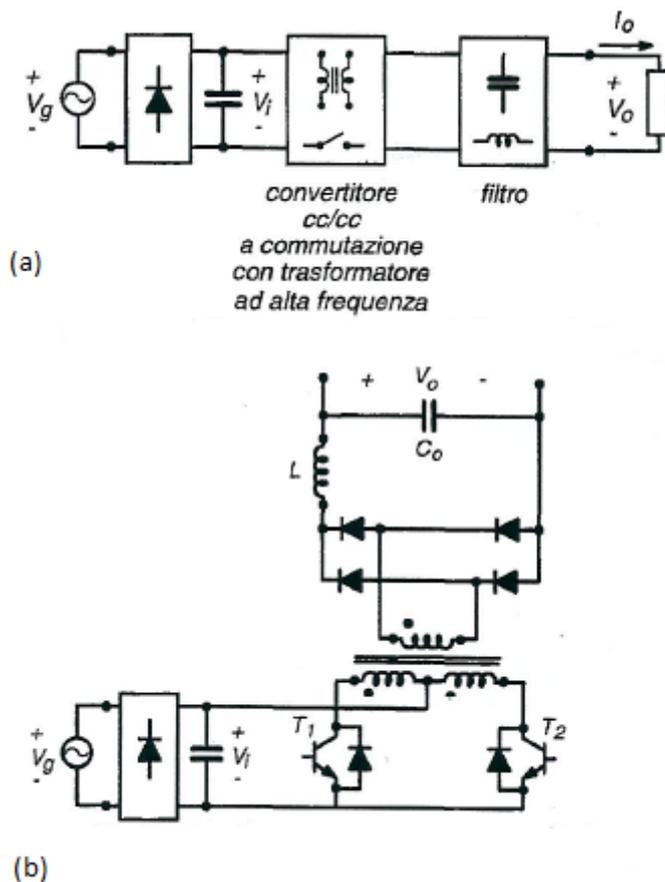


Figura 8: Alimentatore con convertitore CC/CC con trasformatore: (a) schema generale, (b) alimentatore con convertitore Push-pull [Malesani L., 2006]

¹ Con *duty cycle* si intende il rapporto tra il tempo in cui gli interruttori impiegati rimangono accesi e il periodo di commutazione.

*Alimentatori AC/DC
per alte potenze*

In figura 8 si nota come il trasformatore non sia presente direttamente ma è incluso nel convertitore, in particolare in figura 8.b è presente lo schema di un alimentatore con convertitore Push-pull. I convertitori Push-pull sono indicati per potenze molto grandi dell'ordine dei kW. Si possono notare sempre dalla figura, i due interruttori bidirezionali composti da un transistor BJT (a volte sostituiti da un MOSFET di potenza) e un diodo in antiparallelo che permettono il funzionamento a cicli alterni dei due avvolgimenti del primario del trasformatore. Questa configurazione permette lo sfruttamento intero del flusso magnetico positivo e negativo per la generazione di corrente. All'uscita del trasformatore la tensione è ancora alternata e necessita di un ulteriore raddrizzatore prima di arrivare al filtro in uscita composto dalla serie LC.

2.3 ANALISI DELL'ALIMENTATORE GLASSMAN PS/PG001R1A-220

*Compiti dell'unità
master*

L'alimentatore che fornisce potenza alla lampada è composto da due unità: una primaria chiamata *master* e una secondaria chiamata *slave*. In prima approssimazione, si può affermare che il master ha i seguenti compiti:

- prelevare e filtrare la tensione proveniente dalla rete;
- controllare le tensioni e correnti al suo interno e quelle che successivamente andranno nello slave;
- generare le opportune tensioni di alimentazione e/o polarizzazione per i dispositivi che lo compongono;
- fornire una tensione alternata allo slave che provvederà a trasformarla in DC in base alle specifiche richieste da chi lo sta utilizzando;
- permettere la selezione delle tensioni e correnti DC desiderate dall'operatore.

Compiti dello slave

Lo slave invece ha le funzioni di:

- raddrizzare la tensione alternata proveniente dal master;
- fornire la tensione DC voluta al carico (mediante cavo);
- inviare al master i parametri di controllo (tensioni e correnti di feedback).

*Parametri generali
dell'alimentatore
analizzato*

Questo alimentatore da 1kW può essere regolato in tensione tra 0 e 1kV e in corrente tra 0 e 1A. Le applicazioni a cui si rivolge questo strumento sono riportate in tabella 3.

Il data sheet dell'alimentatore e i disegni dei circuiti che lo compongono sono riportati invece nell'appendice C.

Schema generale

In figura 68 è rappresentato lo schema generale dell'alimentatore: si noti come sia diviso in due parti (master e slave) e come siano connesse

Processi di fabbricazione	impiantazione ionica, sistemi di deposizione, rilevamento di guasti.
display	intensificazione di immagini, display radar, generatore d'onde, oscilloscopi.
Strumentazione per ricerca e sviluppo	spettrometri di massa, strumentazione per l'inquinamento dell'aria, microscopio elettronico, apparati nucleari, calibrazione di voltmetri, contatori per radiazioni, laser, sistemi al plasma.
Dispositivi di potenza ad alta tensione	sorgenti ai raggi X, fotomoltiplicatori, rilevatori di radiazioni, acceleratori.

Tabella 3: Principali applicazioni dell'alimentatore impiegato [Gla, 1984]

tra loro da dieci entrate/uscite, ognuna delle quali ha una determinata funzione. Da sinistra ci sono: $V_{fb\ pos}$, I_{fb} , $V_{fb\ neg}$ che indicano le tensioni di feedback positiva e negativa e la corrente di feedback; successivamente si trovano i due attacchi per l'*interlock* che, se non sono connessi con un jumper ad esempio, non permettono il funzionamento dell'alimentatore². Sono anche presenti: il cavo per la connessione tra master e slave del ground affinché abbiano lo stesso riferimento di terra; il *common* che fa da riferimento comune a tutte le tensioni,³; i due cavi *hvac* della tensione alternata verso lo slave che la raddrizzerà e infine un cavo di *ground* che porta direttamente alla messa a terra. Altri due cavi fondamentali sono quello che collega il master alla rete con la presa tripolare e il cavo all'uscita dello slave che porta la tensione e che viene attaccata al carico. In questo caso si ha la serie di alimentatore, reostato e carico. Alla lampada, che costituisce il carico, sono connessi i due cavi di *ground* da connettere agli anodi per portarli a un potenziale il più possibile vicino ai 0V.

Schema a blocchi

In figura 9 invece è presente lo schema a blocchi dell'alimentatore impiegato. La tensione di rete alternata di ingresso passa attraverso un raddrizzatore schematizzato in figura con un ponte di Graetz al quale viene posto in parallelo un filtro. La stessa tensione alternata di ingresso passa attraverso un trasformatore al quale è collegato in parallelo il blocco in cui vengono generate le tensioni di riferimento e di polarizzazione. Le tensioni di riferimento e polarizzazione servono per far funzionare amplificatori operazionali, comparatori, circuiti integrati, modulatore PWM ecc. Collegato in parallelo a quest'ultimo blocco

² È possibile sostituire il jumper con un interruttore esterno che deve comunque essere chiuso ogni volta che l'alimentatore deve funzionare. Appena l'interruttore esterno viene aperto, la potenza erogata dall'alimentatore scende a 0.

³ Il *common* all'acquisto è già collegato al ground per fare il riferimento di tensione al potenziale di terra. L'alimentatore inoltre può lavorare anche col *common* a potenziale flottante, per poterlo fare, è sufficiente levare il jumper tra il *common* e il ground

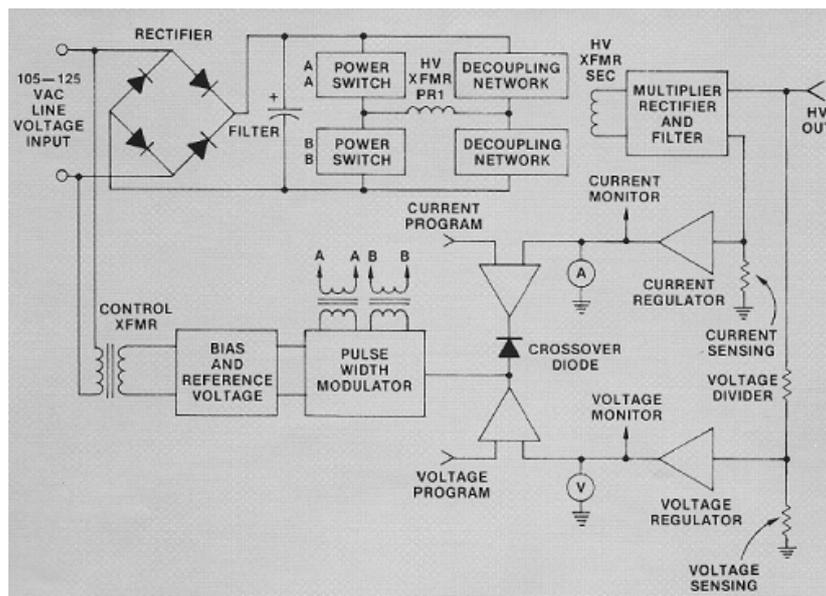


Figura 9: Schema a blocchi dell'alimentatore preso da [Gla, 1984]

c'è il modulatore PWM⁴ che ha come ingressi la tensione voluta dall'operatore e quella proveniente dagli anelli di controllo di tensione e corrente, mentre come uscite i valori da inviare allo stadio switching composto dagli interruttori AA e BB. Gli anelli di controllo prevedono il confronto attraverso comparatore della tensione e/o corrente programmata dall'operatore con quella di uscita. Tornando al filtro posto in parallelo al raddrizzatore, si notano i due switch nominati precedentemente che danno la possibilità di abilitare il trasformatore primario HV XFMR PR1 con il suo secondario. La tensione uscente da qui è naturalmente alternata e andrà raddrizzata con l'ultimo stadio raddrizzatore prima del morsetto di uscita con la tensione HV out.

Nei successivi paragrafi, sarà illustrato il principio di funzionamento di alcuni blocchi che compongono l'alimentatore.

2.3.1 Amplificatore della tensione di feedback, sua gestione e monitoraggio della tensione di uscita

Indicatore di tensione

L'immagine presente in figura 10, mostra il principio di funzionamento dell'indicatore della tensione d'uscita e di come sia portata per il controllo e per la visualizzazione. Queste operazioni si svolgono nel driver assembly assieme ad altri processi⁵.

Misura di tensione positiva

La tensione d'uscita viene prelevata dall'ultimo stadio moltiplicatore⁶ e se positiva è portata con una corrente positiva su $+V_{fb}$ mentre se

⁴ Il modulatore PWM (*Pulse Width Modulator*) consente di generare un segnale per regolare la frequenza di commutazione di certi dispositivi come ad esempio i transistor di potenza.

⁵ Per lo schematico del master si faccia riferimento alla figura presente in appendice.

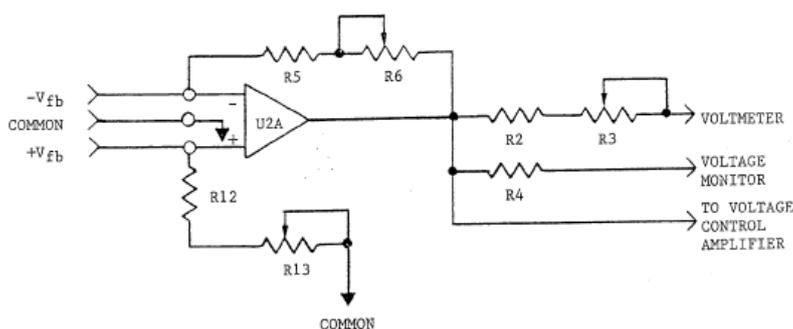


Figura 10: Schema di principio di come avviene prelevata e gestita la tensione di uscita dell'alimentatore [Gla, 1984]

negativa su una corrente negativa su $-V_{fb}$. I due fili sono connessi ai morsetti di ingresso dell'alimentatore come il common. L'amplificatore si comporta da buffer perchè porta in uscita la tensione di ingresso ed in più la rende positiva dato che solo uno dei due ingressi porta segnale utile e diverso da zero (diventa perciò anche un inverter nel caso di tensione negativa all'ingresso). In caso di tensione positiva all'uscita dell'alimentatore, la resistenza R_{12} e il potenziometro R_{13} costituiscono un partitore. Il potenziometro viene regolato affinché possa avere una caduta di tensione pari a 10V da sommare alla tensione di ingresso. Nel caso il segnale sia contenuto in $-V_{fb}$ il morsetto non invertente è a massa, quindi all'uscita del buffer la tensione diventa positiva. La resistenza R_5 e il potenziometro R_6 limitano la corrente nell'anello di retroazione. La tensione d'uscita, a questo punto, passa attraverso le resistenze R_2 e R_3 e arriva al voltmetro, attraverso R_4 arriva all'indicatore della tensione posto sul pannello frontale, e infine direttamente all'amplificatore per il controllo di tensione e successivamente al modulatore PWM.

Misura di tensione negativa

2.3.2 Amplificatore della corrente di feedback, sua gestione e monitoraggio della corrente di uscita

Oltre all'amplificatore per la tensione di feedback c'è bisogno anche dell'indicatore della corrente di uscita dall'alimentatore. Questo compito è svolto all'interno del driver assembly ed ha delle uscite analoghe a quelle dello schema precedente:

Indicatore di corrente

- indicatore di corrente nel milliamperometro presente nel pannello frontale,
- amperometro e
- amplificatore per il controllo della corrente.

6 Per il moltiplicatore e il punto in cui viene prelevata V_{fb} , si faccia riferimento all'immagine 14.

7 Un potenziometro è una resistenza regolabile meccanicamente.

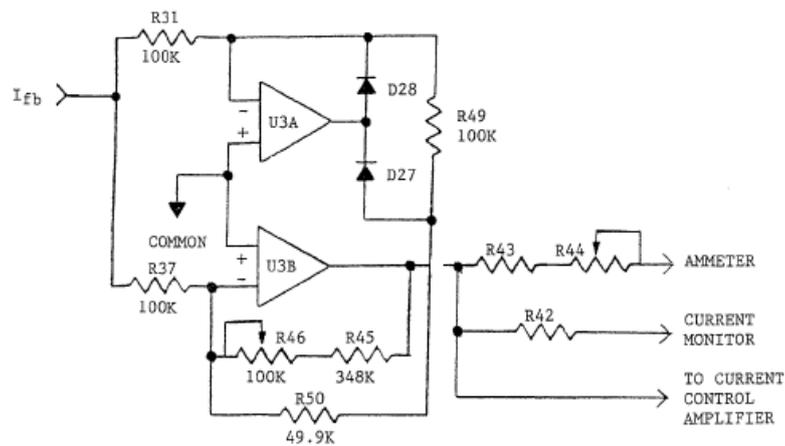


Figura 11: L'amplificatore di figura permette la gestione della corrente di feedback [Gla, 1984]

Lo schema di principio di funzionamento per il monitoraggio di corrente e di come sia gestita la corrente di feedback per il controllo, è riportato in figura 11. Anche in questo caso si nota che il ruolo fondamentale è giocato dagli amplificatori che in questo caso sono due.

Il morsetto di ingresso del sistema indicato con I_{fb} è in realtà un riferimento di tensione in quanto all'uscita è presente una resistenza R_x ⁸ sulla quale cade la tensione di uscita dell'alimentatore positiva o negativa. Il potenziometro R46 è regolato in modo tale che la serie con R45 sia quattro volte la resistenza R37. Si analizzerà solo il caso in cui sia erogata una tensione negativa che la lampada necessita di questa.

Nel caso di tensione d'uscita negativa dell'alimentatore, all'uscita dell'amplificatore in configurazione invertente U3B, c'è una tensione positiva. In contemporanea, l'amplificatore U3A fa da buffer e accende i diodi D28 e D27: queste considerazioni portano a capire come ai capi delle resistenze R49 e R50 non ci sia differenza di potenziale e perciò corrente che scorre. I ruoli delle resistenze R43, R44, R42 sono analoghi a quelli per l'indicatore di tensione.

Legame tra indicatore di corrente e tensione

2.3.3 Modulazione PWM

Il modulatore PWM (*Pulse Width Modulator*) è implementato nel circuito integrato UC1524A ed ha la funzione di regolare lo switching nei circuiti per avere una la tensione alternata voluta.

2.3.4 Regolazione della tensione

Una delle uscite dell'amplificatore/buffer di tensione di feedback è per effettuare il controllo di tensione. In figura 12 è riportato lo sche-

⁸ Per lo schema di principio di funzionamento del moltiplicatore d'uscita dove è contenuta questa resistenza, vedere l'immagine 14

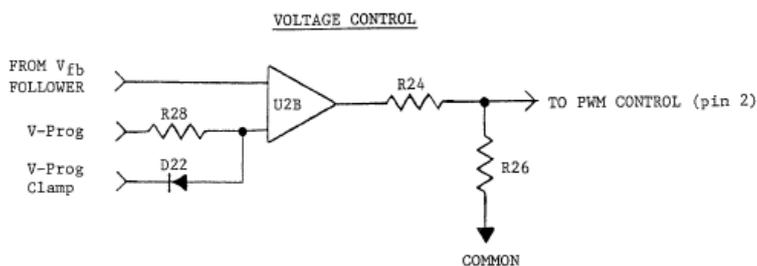


Figura 12: Schema di principio di funzionamento del controllo di tensione [Gla, 1984]

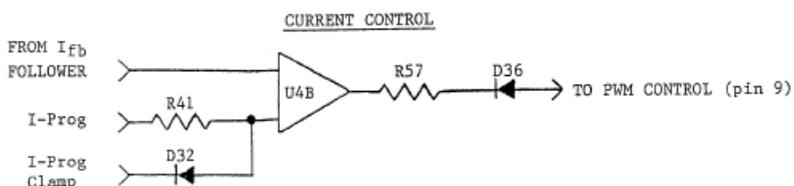


Figura 13: Schema di principio del controllo di corrente [Gla, 1984]

ma generale. Si vedono i due ingressi del comparatore: uno dall'inseguitore descritto precedentemente e uno chiamato V_{prog} che contiene il valore della tensione voluta dall'operatore. Il valore in uscita del comparatore è destinato al modulatore PWM dopo essere passato sul partitore di tensione. Il morsetto indicato con $V_{prog}Clamp$ ritorna la tensione alla rotellina della programmazione della tensione sul pannello frontale.

2.3.5 Regolazione della corrente

Il funzionamento del controllo di corrente è del tutto simile a quello di tensione solo con la variazione dell'uscita. Questa infatti prevede la serie della resistenza R57 e del diodo D36 prima del collegamento col modulatore PWM.

2.3.6 Moltiplicatore finale

La tensione che esce dal master per andare nello slave è ancora alternata e relativamente bassa: necessita quindi di uno stadio finale in cui sia raddrizzata e aumentata. In figura 14 è riportato lo schema di principio: è uno schema ridotto soprattutto per quanto riguarda gli stadi raddrizzatori nella parte in alto, ne sono presenti solo due anziché quattro.

La bassa tensione alternata proveniente dal primario passa attraverso ai trasformatori presenti all'ingresso del moltiplicatore con riferimen-

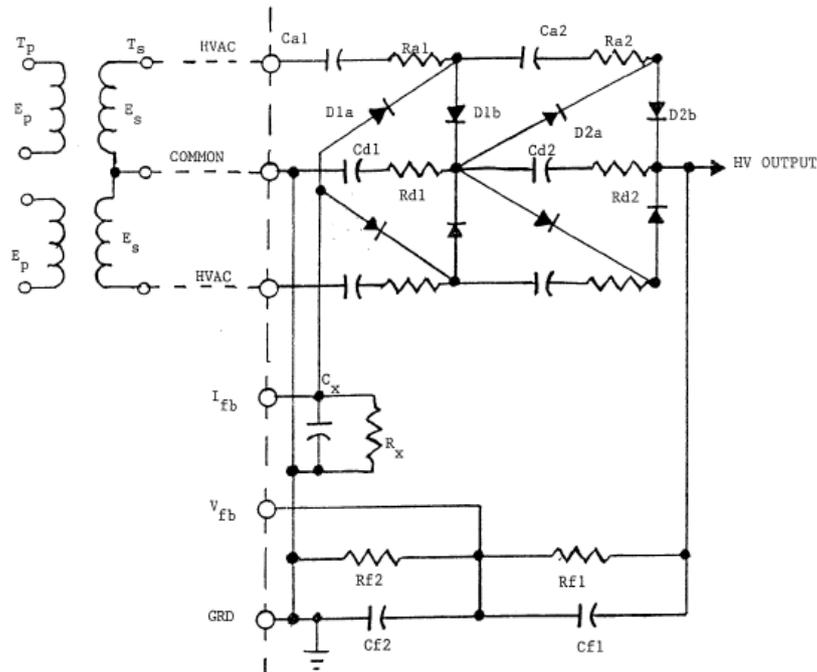


Figura 14: Schema di principio del moltiplicatore di tensione in uscita per la configurazione Cockcroft-Walton [Gla, 1984]

to al common e successivamente a terra. Grazie alla tensione alternata e alla configurazione particolare di diodi e capacità la tensione d'uscita HV_{output} cresce linearmente con il numero di stadi impiegati.

*Moltiplicazione della
tensione nello stadio
finale*

Di seguito è spiegato come la tensione si moltiplichi di stadio in stadio. Verrà analizzato il comportamento della parte del moltiplicatore superiore in quanto il ragionamento si può estendere a quella inferiore in quanto speculare. Si comincia considerando il caso in cui T_s si trovi alla tensione di picco negativa E_s : allora il diodo $D1a$ permette la carica della capacità $Ca1$ perchè $D1b$ è interdetto. Il riferimento di tensione di $Ca1$ è concorde col verso di corrente stabilito dal diodo $D1a$. Per il momento la capacità $Cd1$ rimane isolata.

Quando T_s si trova a potenziale positivo rispetto al common, le tensioni del trasformatore secondario e di $Ca1$ si sommano perchè concordi quindi si possono sostituire, idealmente, con un generatore ideale di tensione pari a $2E_s$. Questo provoca l'interdizione del diodo $D1a$ l'accensione del diodo $D1b$ che carica la capacità $Cd1$ a $2E_s$. Si ottiene perciò un raddoppio della tensione di ingresso.

Il ragionamento fatto fin qui si può continuare a fare anche per ulteriori stadi e si potrà verificare che:

$$V_{\text{out}} = 2nE_s \quad (2.1)$$

$$\Delta V_{pp} = \frac{In}{2fC} \quad (2.2)$$

$$V_{reg} = \frac{I(2n^3 + 3n^2 + n)}{12fC} \quad (2.3)$$

dove n indica il numero di stadi moltiplicatori. Le equazioni precedentemente riportate, sono valide nel caso di componenti ideali e dove tutte le capacità abbiano lo stesso valore⁹. Le resistenze che si vedono in figura sono messe per poter migliorare la scarica dei condensatori e limitare la corrente.

Un'ultima cosa su cui riporre l'attenzione sono le uscite per la corrente di feedback I_{fb} e la tensione di feedback V_{fb} . Questi valori sono prelevati per poter poi effettuare il controllo, la regolazione e il monitoraggio. La tensione V_{fb} è presa dall'uscita dell'alta tensione è prelevata nel mezzo della serie di due paralleli composti da resistenza e condensatore posti successivamente con riferimento al common, la corrente I_{fb} invece è presa sulla prima coppia di diodi posti in diagonale in figura e fatta passare anch'essa attraverso un parallelo di capacità e resistenza.

Tensione e corrente di feedback

⁹ Per una maggiore trattazione sugli stadi moltiplicatori di questo tipo si può fare riferimento a [Jones R.E., 1964]

3 | PROGETTAZIONE DELLA SOR- GENTE

INDICE

3.1	Altre lampade hollow cathode	27
3.2	Struttura generale dello strumento	29
3.3	Miglioramenti meccanici e nuove parti realizzate	30
3.3.1	Catodo	31
3.3.2	Anodi e loro alloggiamenti	32
3.3.3	Flange di chiusura	32
3.3.4	Prigionieri	34
3.4	Immissione del gas	34
3.5	Sistema di raffreddamento	36

Il motivo per cui è stata realizzata una nuova hollow cathode è perchè costituirà la sorgente per poter fare la calibrazione a terra dello spettrografo Phebus presso i laboratori Luxor. La decisione di progettare una nuova hollow cathode è stata presa vagliando cosa presentava il mercato valutando le offerte in base a dei criteri di:

- range di emissione nell'estremo UV,
- costo,
- conoscenza del dispositivo,
- tempistiche di consegna e realizzazione,
- numero di fotoni emessi,
- capacità di lavorare con diversi gas.

*Criteri di valutazione
per la scelta della
sorgente*

Si sono anche cercati altri progetti in pubblicazioni del settore. In mercato sono presenti lampade di tipo hollow cathode cioè lampade a cavità catodica ma i costi di questi dispositivi con i loro accessori sono elevati.

Da qui in avanti in questo capitolo ci si riferirà a una lampada hollow cathode con l'abbreviazione HCL.

3.1 ALTRE LAMPAD E HOLLOW CATHODE

La prima soluzione trovata è della ditta *McPherson* e si può vedere in figura 15. Questa lampada rispecchiava tutte le caratteristiche sopra citate. Presenta un raffreddamento a liquido, l'anodo in alluminio è isolato elettricamente da un flangia in *Kel-F* dal catodo fatto in acciaio inox. È necessaria una tensione pari a 2kV e una corrente compresa

*HCL della
Mc-Pherson*

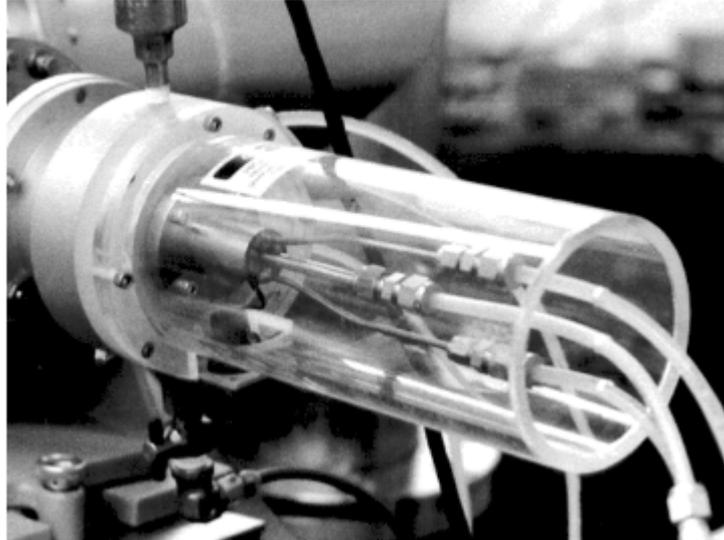


Figura 15: HCL di McPherson.

tra i 250 e i 500 mA per portare il gas allo stato di plasma. L'acquisto di questa lampada comprende anche l'alimentatore, alzando di molto il prezzo finale in quanto quello in possesso non è adatto alle condizioni di utilizzo di questa: è stata di conseguenza scartata questa opzione.

*Lampada a scarica
capillare*

La seconda soluzione è una lampada a scarica capillare. Questo tipo di lampada prevede una scarica attraverso il catodo cilindrico, molto più stretto rispetto ad una HCL, e successivamente a un capillare che fa da anodo. Nella figura 16 è riportata la sezione della lampada. I numeri presenti indicano: 1 flangia d'uscita metallica con sistema di pompaggio differenziale connesso a massa, 2 dielettrico (teflon), 3 capillare di nitrato di boro BN in cui passa la scarica, 4 elettrodo in rame intercambiabile collegato all'alta tensione, 5 cavità per il raffreddamento ad acqua, 6 ingresso e uscita per l'acqua, 7 dielettrico (teflon), 8 ingresso in metallo per gas e 9 finestra di vetro. Il problema di questo tipo di lampade è che hanno una brillantezza inferiore alle HCL.

HCL non custom

In commercio sono presenti anche delle HCL non custom cioè lampade che hanno al loro interno un solo tipo di gas o composto. Queste lampade, a causa della loro fragilità, poca brillantezza e dovendone comprare più di un esemplare, non sono state scelte. A titolo informativo, ditte quali la *Heraeus-Cathodeon* e la *Perkin-Elmer* producono questo tipo di HCL.

Si è deciso infine di progettare una nuova HCL partendo dai disegni di quella già presente al laboratorio Luxor.

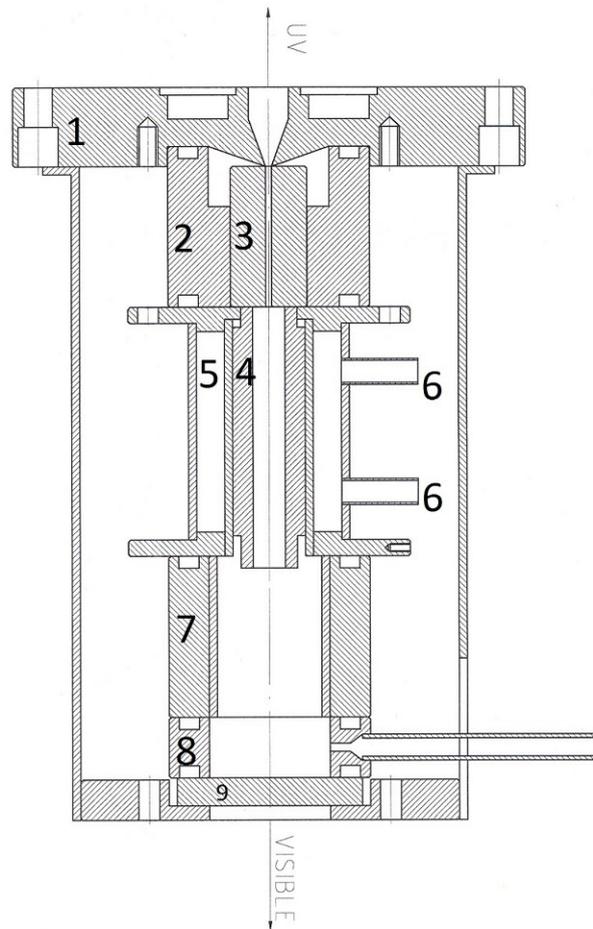


Figura 16: Sezione della lampada a scarica capillare.

3.2 STRUTTURA GENERALE DELLO STRUMENTO

Si è cominciato il lavoro confrontandosi con chi ha svolto misure con questa lampada e con chi l'aveva realizzata. Si è fatto questo per capire cosa si poteva migliorare senza andare a intaccarne il funzionamento e, possibilmente, renderla più efficiente e usabile. Si sono individuati di conseguenza: gli aspetti negativi della vecchia lampada, cosa non era possibile modificare e cosa quindi poter migliorare. Ci si è anche avvalsi della competenza e dell'esperienza delle persone che effettivamente avrebbero realizzato il lavoro cioè l'*officina meccanica del Dipartimento di Fisica dell'università di Padova* e dei consigli di chi avrebbe procurato il materiale per il raffreddamento ovvero la ditta *Fizner Automazione di Padova*.

Gli obiettivi che ci si è preposti di raggiungere e rispettare in fase di progettazione sono stati:

Obiettivi del progetto

1. semplificazione della configurazione togliendo le parti non più

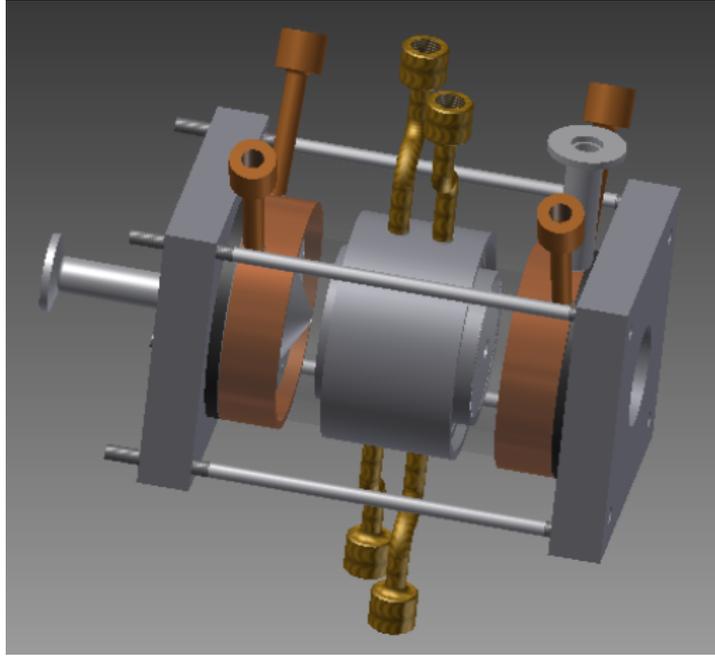


Figura 17: Disegno 3d della nuova lamapada realizzato con Autodesk Inventor 2011.

indispensabili,

2. compattare la struttura,
3. rendere meno ingombrante il sistema di raffreddamento,
4. mantenere la configurazione attuale del catodo e degli anodi,
5. rispettare le dimensioni per l'apertura per il gas in base alla nuova valvola a spillo acquistata.

Per rendere più immediata la trattazione, si sono messi tutti i disegni CAD, sia della nuova che della vecchia HCL, negli appendici A e B.

3.3 MIGLIORAMENTI MECCANICI E NUOVE PARTI REALIZZATE

In questa sezione sono riportati i miglioramenti effettuati rispettando gli obiettivi precedentemente indicati. In più si è dovuto rispettare dei vincoli dati da alcuni pezzi progettando i nuovi componenti partendo dalle specifiche di questi ultimi. Le limitazioni che si hanno, sono dettate dai vetrini in pyrex che isolano il catodo dagli anodi, gli o-ring che hanno spessore e diametro fissi, e l'interfaccia della flangia d'uscita per poter essere connessa all'apertura del monocromatore. Per farli è stato necessario modificare alcuni componenti. Tutti i componenti realizzati in officina sono fatti in acciaio inox.



Figura 18: Catodo con i quattro tubi per il raffreddamento saldati e avvolti col nastro isolante. Si possono notare la saldatura attorno al cilindro centrale, l'o-ring per tenere il vuoto con il vetrino in pyrex e il foro filettato per l'attacco dell'alimentazione.

3.3.1 Catodo

Partendo dal cuore della lampada, ovvero dal catodo, si è deciso di avere il cilindro interno costituito da un unico pezzo (figura 37) anzichè da due pezzi (figure 53 e 54) com'era prima.

Cilindro del catodo

Le dimensioni dei fori per il raffreddamento e per l'alimentazione e della cavità sono gli stessi del vecchio progetto. Inoltre i tubi per l'ingresso e l'uscita dell'acqua, sono già provvisti di viti Swagelok per poter inserire i tubi di gomma del raffreddamento. La particolare geometria dei tubi uscenti dal catodo, permette loro di fissare con maggior comodità da parte dell'utente quelli di gomma. Il catodo, a causa delle elevate temperature a cui viene portato quando la lampada è accesa, necessita di una protezione in plexiglass. La struttura porta catodo presenta da entrambe le parti degli alloggiamenti per o-ring; questo perchè quando la lampada sta lavorando, i vetri in pyrex devono essere perfettamente attaccati al catodo e al rispettivo alloggiamento dell'anodo. Nell'uso della lampada bisogna fare particolare attenzione alla pulizia dei vetri e della superficie a contatto con i pezzi in acciaio, in quanto le superfici di appoggio devono permettere la massima aderenza tra entrambi per poter raggiungere la situazioni di vuoto desiderata.

Raffreddamento catodo

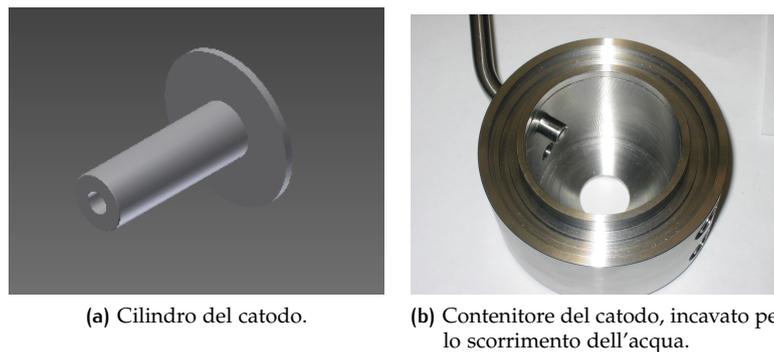


Figura 19: Catodo

3.3.2 Anodi e loro alloggiamenti

*Struttura della
flangia*

Tubo ingresso gas

I due alloggiamenti per anodi non sono stati modificati di molto dalla precedente configurazione. Sono composti di una flangia principale che presenta da una parte un alloggiamento per l'o-ring e per il vetrino, mentre dall'altra da un percorso cavo per l'acqua. Questa flangia è successivamente saldata con una flangia da chiusura che fa da coperchio. In entrambi gli alloggiamenti sono presenti due fori per ingresso e uscita dell'acqua mentre l'ingresso per l'immissione del gas è presente solamente in uno. La flangia per l'inserimento del gas è una KF10 mentre le geometrie dei coni non sono state toccate. Tutti i tubi usati sono dritti e tutti quelli per l'acqua presentano già una vite Swagelok saldata.

Una particolare attenzione è stata fatta per il tubo di ingresso gas: lo si è realizzato molto più alto rispetto a prima per poter permettere una maggiore comodità nell'uso della nuova valvola a spillo differente per struttura esterna e ingombro dalla precedente. Per permettere la buona saldatura dei tubi con il corpo della flangia, si è reso necessario scavare con la fresatrice un piccolo anello attorno al buco, per poter avere un terminale di un ordine di grandezza di massa confrontabile con quello del tubo. La saldatura diretta tra tubo e corpo non è possibile, dato che non si riuscirebbe a scaldare sufficientemente il corpo attorno al foro per praticare la saldatura.

3.3.3 Flange di chiusura

La geometria delle flange di chiusura costituisce la maggior modifica approntata alla lampada. Sono state semplificate togliendo loro le camere esterne.

Gli alloggiamenti per gli anodi sono ora direttamente a contatto con le flange. Rimuovendo le camere, è stata di conseguenza cambiata la posizione del tubo su cui posizionare il misuratore di pressione. Questo è ora posto al centro della flangia (prima era in posizione laterale) ed è stata rimossa anche l'apertura per la finestra in vetro. Il motivo per cui prima c'erano le camere era per poter inserire delle pompe per risucchiare il gas: siccome questa funzionalità non è mai stata sfruttata, sono state tolte. Altra modifica compiuta sulle flange di chiusura della

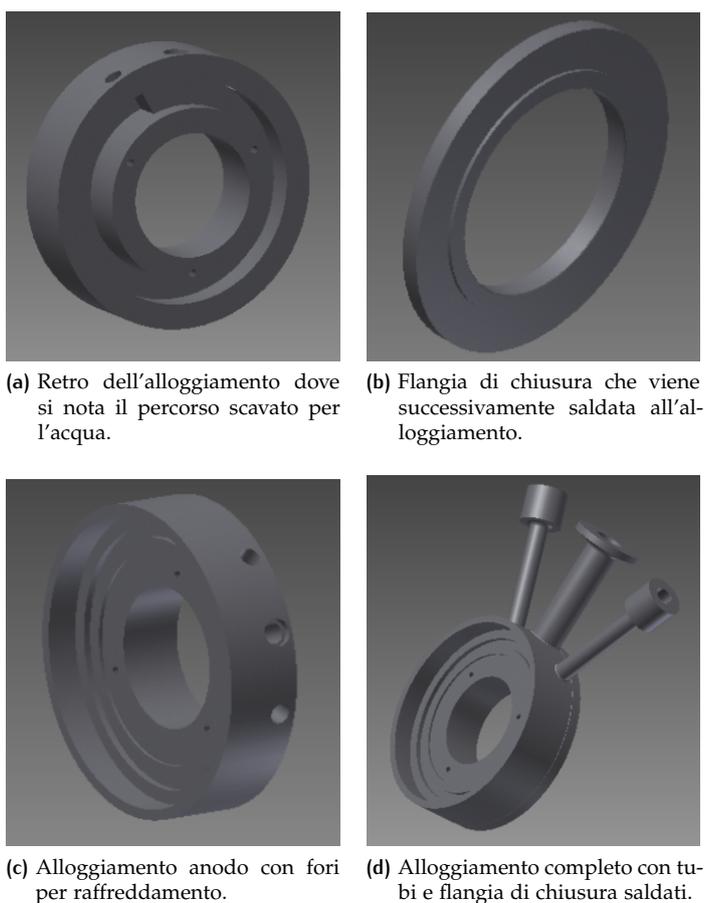
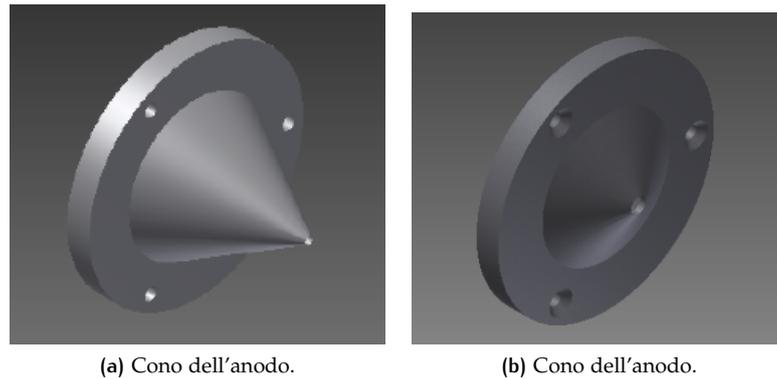


Figura 20: Uno dei alloggiamenti degli anodi.



Figura 21: Alloggiamento dei coni prima e dopo la saldatura.

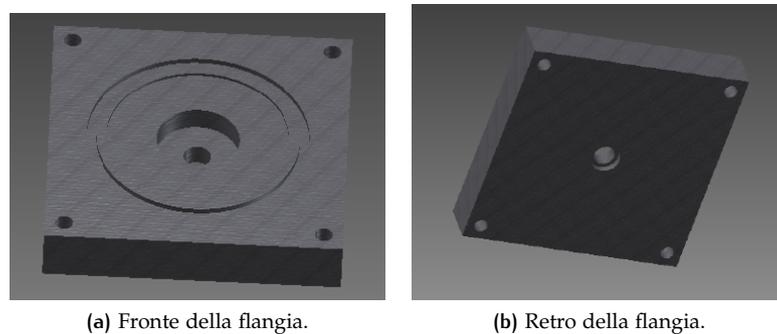
lampada è il materiale con cui ora sono fatte, ovvero l'acciaio, dato che precedentemente erano in alluminio.



(a) Cono dell'anodo.

(b) Cono dell'anodo.

Figura 22: Coni dell'anodo con fori per le viti che li attaccano ai loro rispettivi alloggiamenti.



(a) Fronte della flangia.

(b) Retro della flangia.

Figura 23: Flangia con foro per tubo per misurazione della pressione interna.

3.3.4 Prigionieri

Gli ultimi oggetti prodotti in officina sono i quattro prigionieri che tengono unite le due flange. Prima di metterla in funzione viene portata infatti in una condizione di circa 10^{-5} mbar. Questa situazione di vuoto spinto ne favorisce il loro compito.

3.4 IMMISSIONE DEL GAS

Il gas, che è contenuto in bombola, è immesso nella HCL attraverso un tubo di gomma di connessione con misuratore di pressione, che lo porta alla valvola a spillo. Quest'ultima è chiusa ermeticamente sulla HCL attraverso degli o-ring uniti da cravatte. La pressione di ingresso del gas è definita dalla valvola a spillo.

La nuova valvola a spillo acquistata è il modello LV10K prodotta dalla Edwards Vacuum. Una manopola esterna consente una precisa regolazione di pressione permettendo al gas di portarsi fino a 10^{-5} mbar. Girando la manopola, lo spillo all'interno della valvola apre o chiude maggiormente il canale di flusso del gas andando a modificare la quantità che ne passa attraverso.

Valvola a spillo

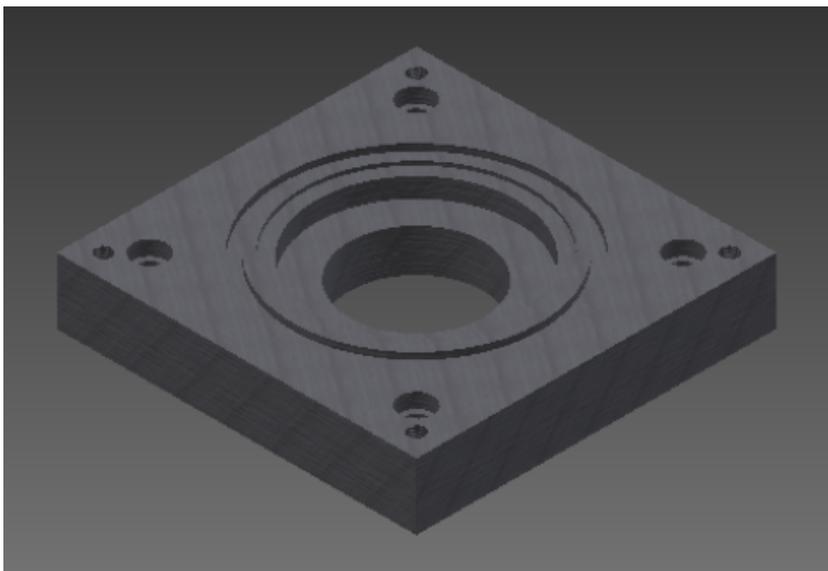
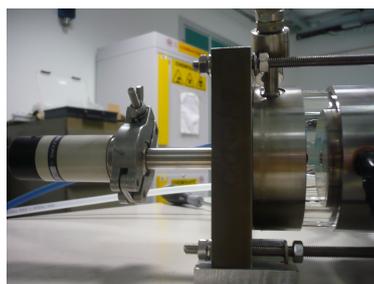


Figura 24: Flangia esterna di uscita della radiazione.



(a) Vecchia flangia con vetrino per la visuale interna e l'allineamento.



(b) Nuova flangia con attacco diretto del misuratore di pressione.

Figura 25: Confronto visivo tra vecchia e nuova flangia finale.

Prima dell'uso, si è provveduto al test della valvola sulla vecchia HCL per verificare che si potesse portare alla minima pressione di funzionamento e che lo strumento non presentasse difetti. Il test è stato compiuto nella facility UV del laboratorio Luxor e ha dato esito positivo.

Test valvola a spillo

Ci si è accorti proprio durante il test che la nuova valvola a spillo avrebbe richiesto un ingombro maggiore per il suo impiego. Di conseguenza, con il consulto dell'addetto dell'officina, si è deciso di allungare il tubicino di acciaio così da aumentare lo spazio tra valvola a spillo e gli altri due tubi per il raffreddamento, e permettere quindi all'operatore una maggiore comodità di regolazione. Il motivo per cui il tubicino è d'acciaio è dato dal fatto che è necessario un materiale resistente alle flessioni che possono avere luogo durante l'uso della HCL.

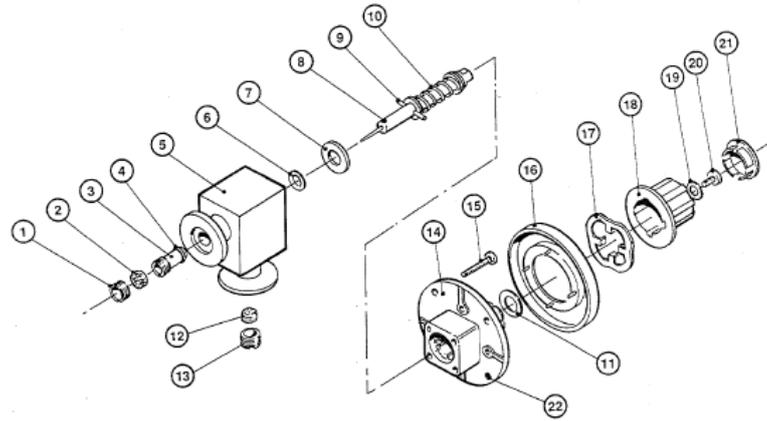


Figura 26: Vista esplosa della valvola a spillo. I numeri nei tondini della figura indicano: 1 dado filtro, 2 filtro, 3 alloggiamento per l'o-ring per la valvola, 4 alloggiamento per l'o-ring per la valvola (nel corpo della valvola), 5 corpo della valvola, 6 alloggiamento per l'o-ring per la valvola (nel corpo della valvola), 7 rondella di tenuta, 8 ago, 9 spillo, 10 molla, 11 rondella, 12 filtro, 13 dado filtro, 14 sostegno per gradazione, 15 vite, 16 gradazione, 17 rondella, 18 regolatore, 19 rondella, 20 vite, 21 cappuccio e 22 foro di pannello di montaggio.

3.5 SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO

Il raffreddamento della lampada è di tipo ad acqua ed interessa catodo e anodi. L'acqua che scorre all'inizio su un'unico tubo, viene poi suddivisa da un opportuno componente idraulico, chiamato *ripartitore*, che presenta quattro uscite, due per il catodo e una per ognuno dei due alloggi degli anodi. L'acqua che scorre all'interno della lampada è fatta uscire da altri quattro tubicini del raffreddamento che sono a loro volta ricongiunti attraverso un altro componente idraulico. Da qui in poi l'acqua scorre in un unico tubo di gomma verso un bacino raccogliatore.



Figura 27: Particolare del rubinetto di ingresso. Il tubo tigrato entra nel ripartitore idraulico che divide il flusso d'acqua in quattro. I due rubinetti sono messi per poter meglio gestire il flusso di acqua entrante nel catodo.



Figura 28: Raccordo per i tubi dell'acqua di uscita dalla lampada nel tubo tigrato.

4

TEST E MISURE

INDICE

4.1	Facility a incidenza normale	39
4.1.1	Sistema di controllo della pressione	40
4.2	Test effettuati	41
4.3	Spettro di emissione del Neon realizzato con la nuova lampada hollow cathode	42

In questo capitolo sarà esposto come e dove si sono svolti i test, e alla fine sarà presentato lo spettro di emissione del neon ottenuto con la nuova lampada realizzata.

4.1 FACILITY A INCIDENZA NORMALE

Il test della lampada è stato compiuto nella facility a incidenza normale presente al laboratorio Luxor di Padova. Nel campo dell'EUV è necessario avere un sistema che consenta di lavorare in alto vuoto, a causa dell'alto assorbimento che avrebbe l'aria a pressione atmosferica. Infatti a lunghezze d'onda inferiori ai 200nm, sono richieste condizioni di vuoto fino a 10^{-6} mbar.

Condizione per l'emissione nell'EUV

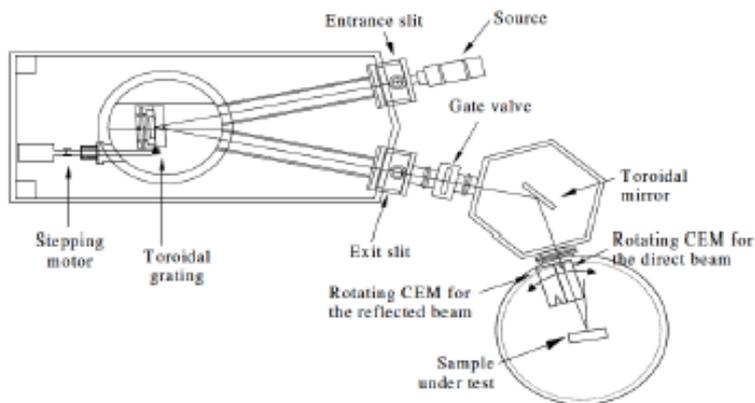


Figura 29: Struttura della facility EUV a incidenza normale [A.J., 2010] e [M., 2010].

Saranno elencati qui di seguito gli elementi che compongono la facility UV, impiegati nei test effettuati.

Componenti della facility a incidente normale del Luxor

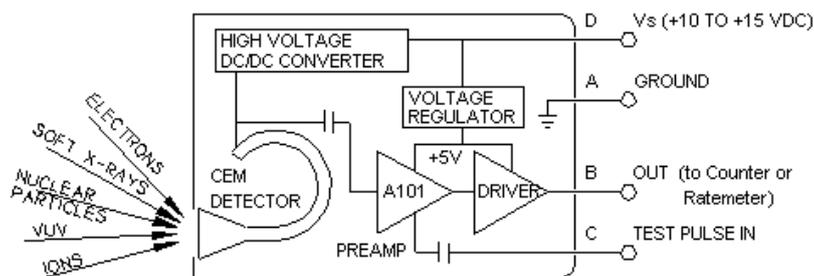


Figura 30: Schematico del CEM preso da [CEM, 2002].

1. *Sorgente*: lampada hollow cathode.
2. *Apertura d'ingresso*: permette la regolazione della dimensione della larghezza dell'apertura verso il monocromatore¹, attraverso un misuratore micrometrico;
3. *Monocromatore*: installato in una camera d'acciaio, contiene al suo interno un reticolo toroidale che riflette la radiazione proveniente dall'apertura all'ingresso verso quella d'uscita. È ricoperto di platino, presenta 600 fessure/mm ed è mosso in senso orario da un motorino che lo fa ruotare a scatti, in modo da poter selezionare la lunghezza d'onda desiderata. L'angolo di incidenza tra la radiazione entrante e il monocromatore è di 25° come con quello d'uscita.
4. *Apertura d'uscita*: identica a quella d'entrata;
5. *Valvola*: consente la comunicazione o l'isolamento tra la camera del monocromatore e quella dello specchio.
6. *Specchio toroidale*: ricoperto di platino è posto in una camera esagonale; consente di convogliare la radiazione proveniente dal monocromatore alla camera di misura.
7. *Camera di misura*: contiene il sostegno per il campione da analizzare e il CEM. Il CEM è il trasduttore che permette il rilevamento della radiazione composta da elettroni, ioni, luce nell'VUV e particelle nucleari. Gli elettroni sono moltiplicati dal canale elettronico (da cui il nome di CEM ovvero *Channel Electronic Multiplier*) e vengono mandati al contatore. I conteggi relativi agli spettri di emissione sono mandati successivamente a una scheda di acquisizione per poter essere analizzati dall'utente.

4.1.1 Sistema di controllo della pressione

Il controllo della pressione all'interno della HCL è permesso dall'indicatore di pressione posto ora direttamente nella flangia opposta a

¹ L'apertura d'ingresso, come quella d'uscita, si trovano su una circonferenza, chiamata *circonferenza di Rowland*.

quella d'uscita. L'indicatore con display digitale impiegato, è il modello *TGP 300* di Balzers che è connesso con cavo e rilevatore alla flangia. Flangia e rilevatore sono uniti da un o-ring, e il tutto è tenuto insieme da una cravatta a vite.

4.2 TEST EFFETTUATI

La lampada e i suoi componenti hanno richiesto test che riguardassero pressione, vuoto e funzionamento. Il primo elemento testato è stata la valvola a spillo, come già anticipato nel capitolo precedente. I successivi elementi da testare, una volta montata tutta la lampada, sono il raffreddamento ad acqua e il valore di vuoto raggiunto all'interno.

Nel test del raffreddamento, si è voluto far scorrere la massima quantità d'acqua possibile proveniente dal rubinetto, per un tempo di circa 30 minuti con la lampada spenta. La durata del test è stata scelta in base al tempo in cui la lampada rimane accesa quando si trova in funzione. Da notare comunque che, quando è in funzione, non viene mai fatto scorrere la massima capacità d'acqua, ma solo metà rubinetto viene aperto. Questo test è stato utile per vedere se tutti i componenti idraulici tenessero bene e non ci fosse perdita d'acqua. Infatti, se in un primo tempo si è provveduto all'avvolgimento di nastro in *teflon* tra le varie filettature affinché non ci fossero perdite d'acqua, si è convenuto che fosse meglio impiegare il teflon liquido per coprire le filettature. Questo accorgimento ha dato buoni frutti migliorando decisamente il risultato, non avendo perdite in nessun posto.

*Test del
raffreddamento*

Il test della lampada accesa è avvenuto successivamente. Per poter effettuare quest'operazione, si è posto la lampada nella facility a incidenza normale del Luxor. Come prima cosa si sono puliti i pezzi con una soluzione di acqua sterilizzata e acetone, e lasciati nella macchina pulitrice a ultrasuoni. Montata la lampada e messi gli o-ring², si è acceso il raffreddamento, immesso il gas e si è portata la lampada, attraverso una pompa scroll, a un vuoto di $5.4 \cdot 10^{-2}$ mbar. Poco prima di arrivare a questa condizione, si è potuto accendere la pompa turbomolecolare per raggiungere un vuoto più spinto, dell'ordine dei 10^{-6} mbar. A questo punto, è stato acceso l'alimentatore, portandolo, prima a una tensione di 800V e, dopo l'avvenuta formazione del canale di plasma, a una corrente di 200mA e tensione di 300V. Si è visto come appena acceso l'interruttore, si formasse un canale luminoso tra i due anodi. Con la vecchia lampada invece erano necessari una decina di secondi per apprezzare l'inizio della scarica.

*Test della lampada
accesa con Neon*

² Gli o-ring in *Vyton* sono messi per tenere il vuoto tra le flange e i vetrini. Questi ultimi sono in *Pyrex* ed hanno la doppia funzione di: isolare elettricamente le flange del catodo dagli anodi, e permettere all'operatore di vedere se il canale di plasma è formato.

4.3 SPETTRO DI EMISSIONE DEL NEON REALIZZATO CON LA NUOVA LAMPADA HOLLOW CATHODE

Condizioni operative per l'acquisizione dello spettro

Si é deciso di acquisire lo spettro di emissione del Neon nel range compreso tra i 20nm e gli 80nm. La misura é stata effettuata nelle seguenti condizioni:

- pressione: $6.3 * 10^{-1}$ mbar all'interno della lampada;
- tensione di innesco: 800V;
- tensione a regime: 300V
- corrente a regime: 160mA;
- reticolo: 1/4;
- durata acquisizione: 1s.

I dati sono stati elaborati con Matlab. Il grafico in ordinate semilogaritmiche é riportato in figura 36. Dal disegno si possono ben notare i picchi relativi di emissione a 40.7nm, 46.1nm e il maggiore a 74.4nm. Le righe di emissione a queste lunghezze d'onda sono causate dalla diseccitazione dagli stati di ionizzazione a cui l'atomo di Neon si porta. I primi due riguardano il primo stato del Ne (*NeI*), mentre l'ultima linea é del secondo (*NeII*).

Spettro di emissione

Lo spettro di emissione 35 della HCL plottato in scala semplice, puó essere confrontato con quello di figura 34. Si possono notare le differenze di picchi ottenuti nel numero di conteggi. Il motivo di questa differenza é dovuto al fatto che, la HCL é un tipo di lampada che accentua maggiormente solo alcune righe spettrali.

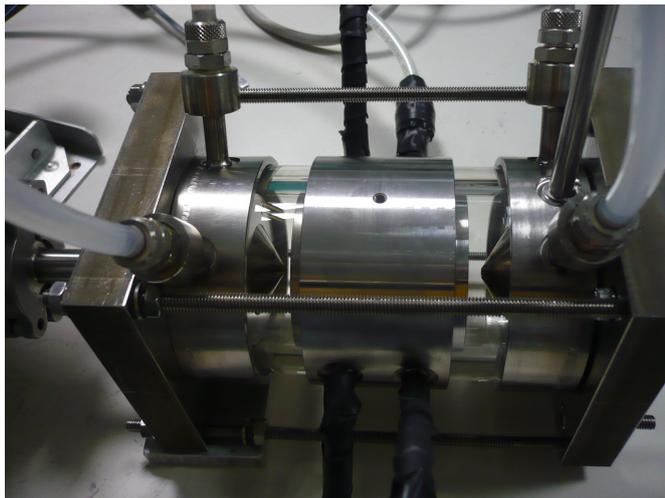


Figura 31: Lampada hollow cathode spenta.

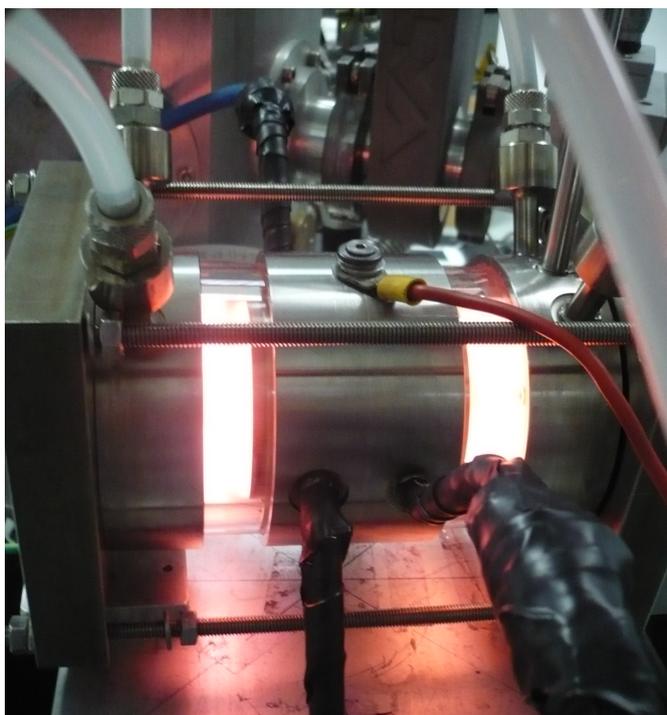


Figura 32: Lampada accesa con canale di plasma non ancora formato.

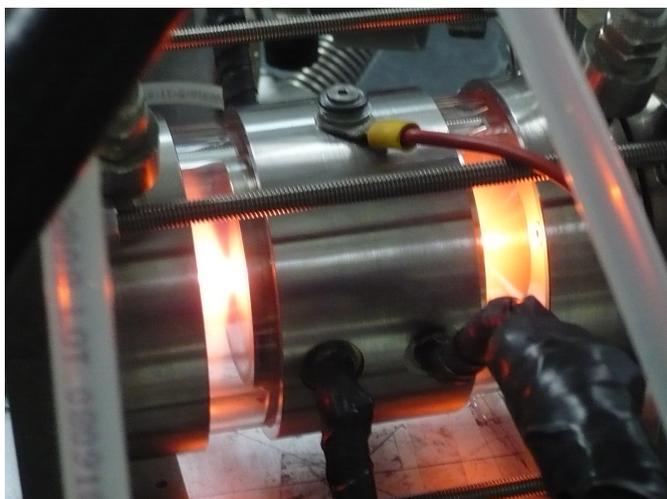


Figura 33: Lampada accesa con canale di plasma formato.

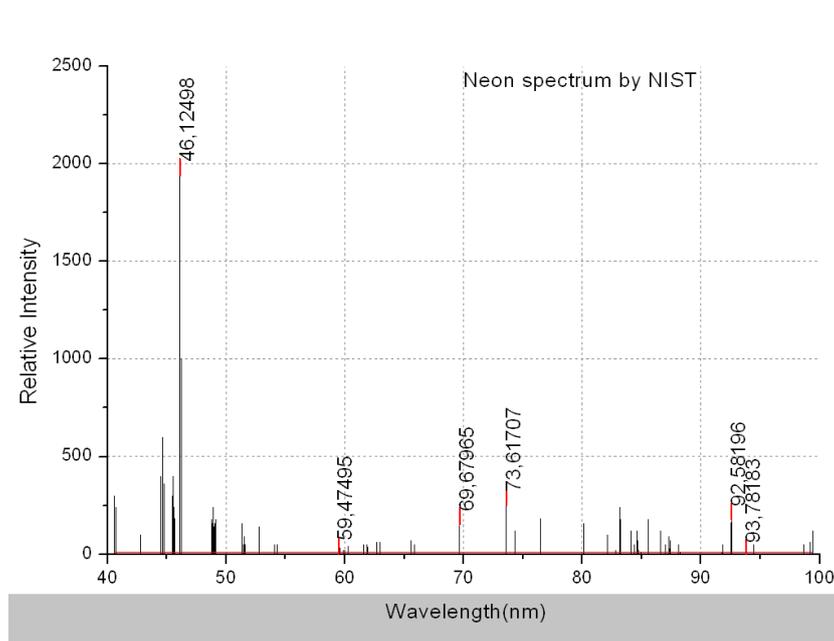


Figura 34: Spettro ideale di emissione del Neon preso da [NIS, 2010].

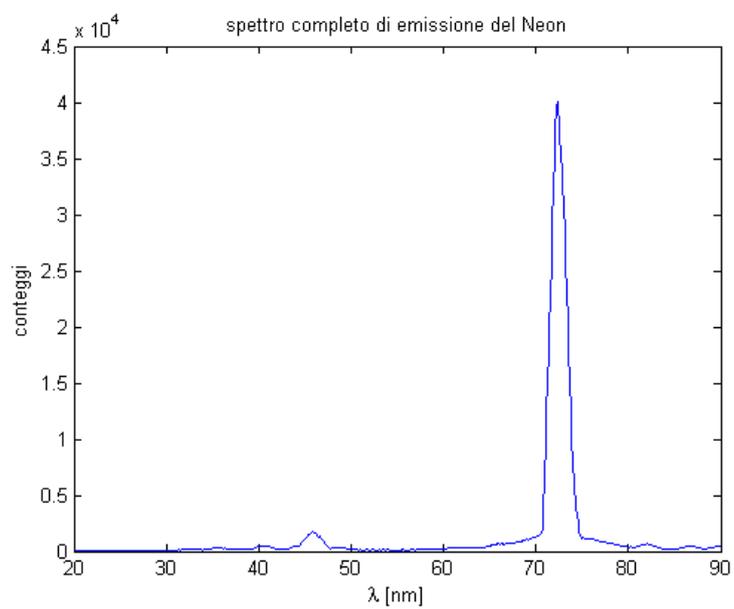


Figura 35: Spettro di emissione del Neon in scala semplice.

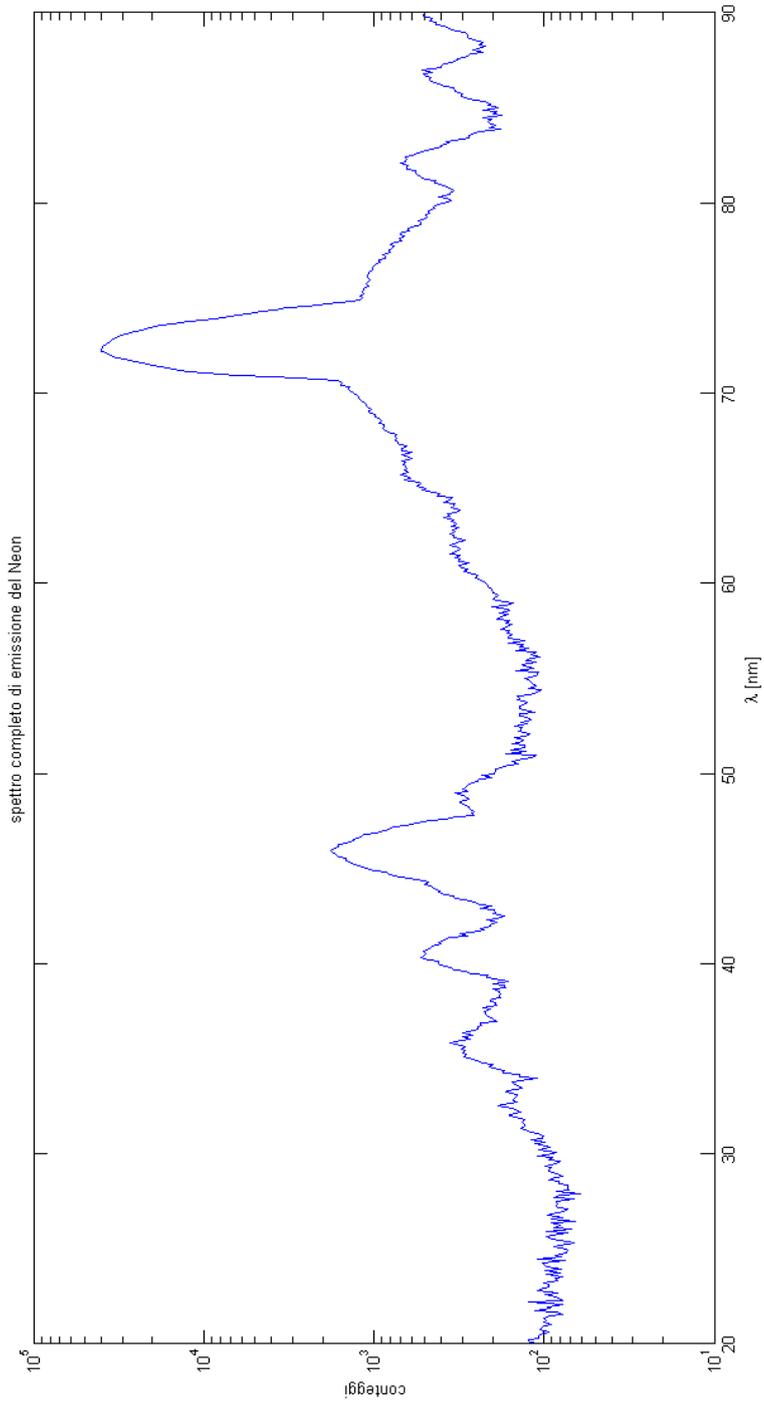


Figura 36: Spettro di emissione del Neon in scala semilogaritmica.

5 | CONCLUSIONI

Il vecchio progetto é stato migliorato in vari punti: velocitá di formazione del canale per l'emissione, riduzione delle dimensioni, rimozione dei componenti inutilizzati e sensibile miglioramento per la struttura del raffreddamento.

L'uso della lampada nel prossimo futuro riguarderá le misure di riflettivitá di :

- specchi e reticoli per Phebus nell'EUV;
- specchi e reticoli per Metis¹;
- rivestimenti multistrato.

Quindi la sua funzione sará a piú ampio raggio rispetto al motivo per cui é stata realizzata.

Il progetto della lampada ha richiesto un periodo di sei mesi nei quali ci si é confrontati con varie persone: chi l'aveva utilizzata, chi la utilizzerá e chi l'avrebbe realizzata in officina. Questi confronti sono sempre stati importanti e utili per la crescita della conoscenza personale e per arrivare al risultato finale.

Il miglioramento che si potrebbe fare in futuro, é la sostituzione del raffreddamento a liquido con uno ad aria cosí da rendere lo strumento portatile dato il minor ingombro che lo strumento dovrebbe avere.

¹ Telescopio per immagini e spettroscopia, presente nella missione spaziale Solar Orbiter.

A | DISEGNI DEL NUOVO PROGETTO

I disegni presenti in questo appendice sono stati realizzati in collaborazione con l'officina del Dipartimento di Fisica dell'università di Padova. Il software impiegato per i disegni è stato *Autodesk Inventor Professional 2011* che permette anche la realizzazione 3d degli oggetti.

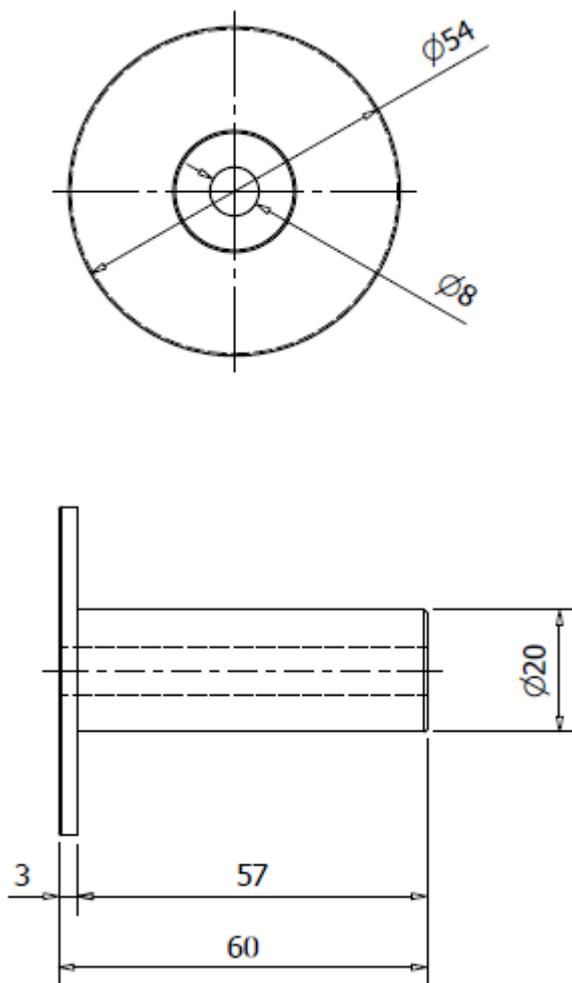


Figura 37: Catodo centrale. Da notare come il cilindro sia composto da un pezzo unico.

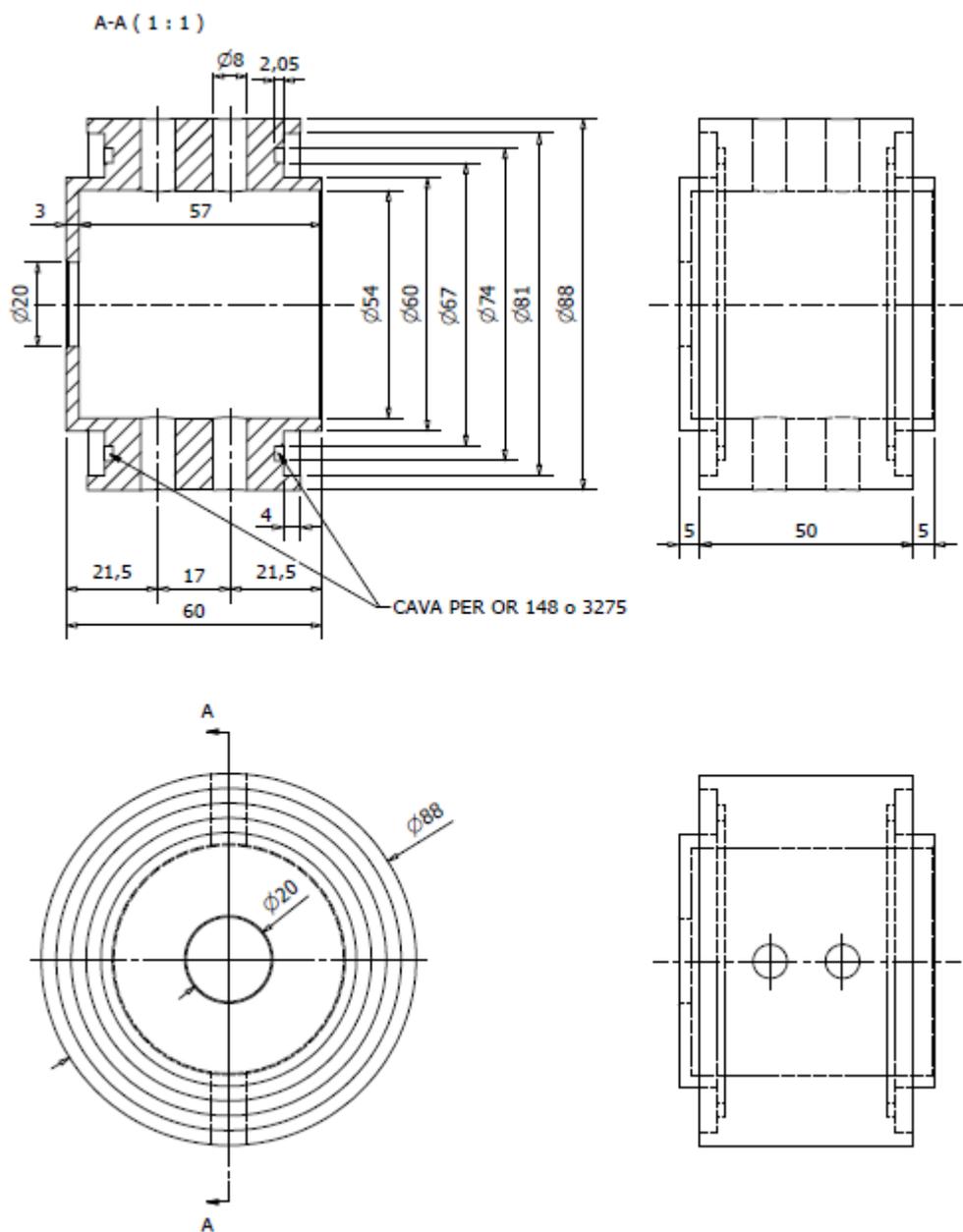


Figura 38: Alloggiamento per catodo con fori per i quattro tubi corti.

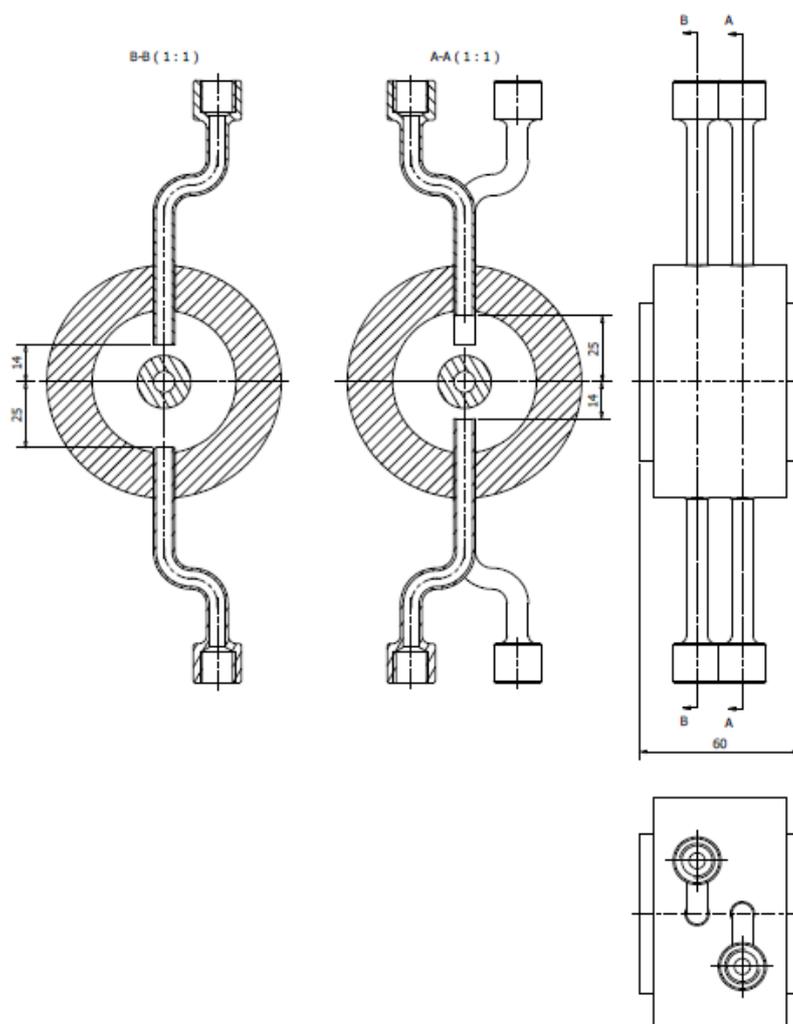


Figura 39: Profilo dell'alloggiamento per catodo con tubi per raffreddamento saldati.

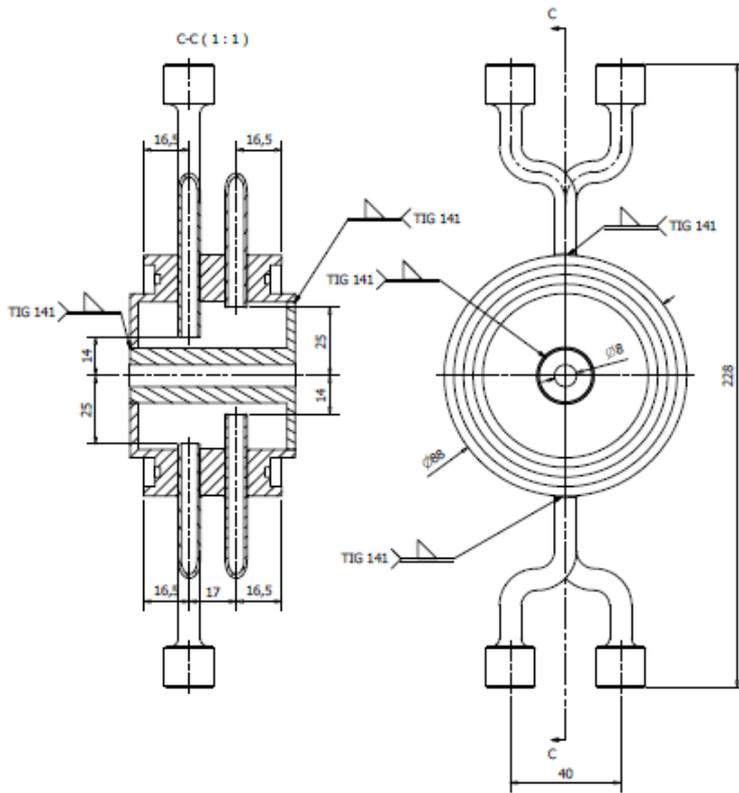


Figura 40: Sezione dell'alloggiamento per catodo con tubi montati.

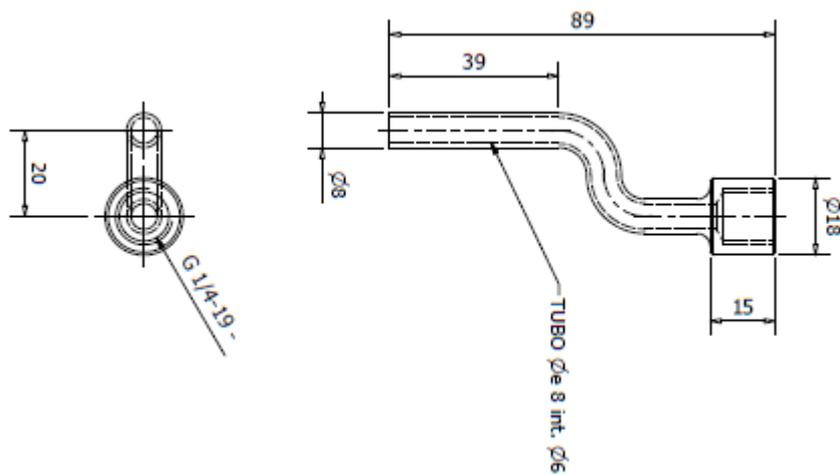


Figura 41: Tubo corto con vite Swagelok per poter immettere il tubo del raffreddamento a acqua.

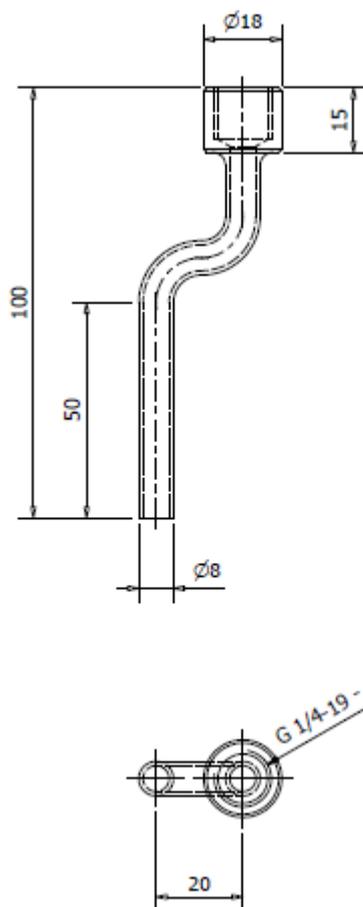


Figura 42: Tubo lungo con vite Swagelok per poter immettere il tubo del raffreddamento a acqua.

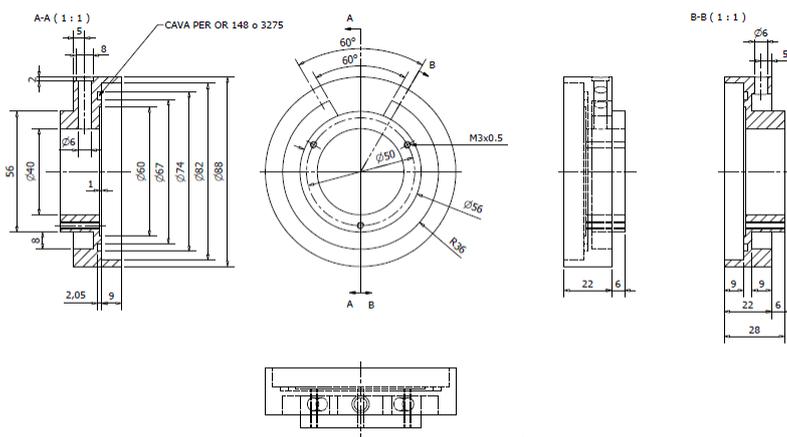


Figura 43: Alloggiamento per anodo con due fori per raffreddamento e uno per immissione gas.

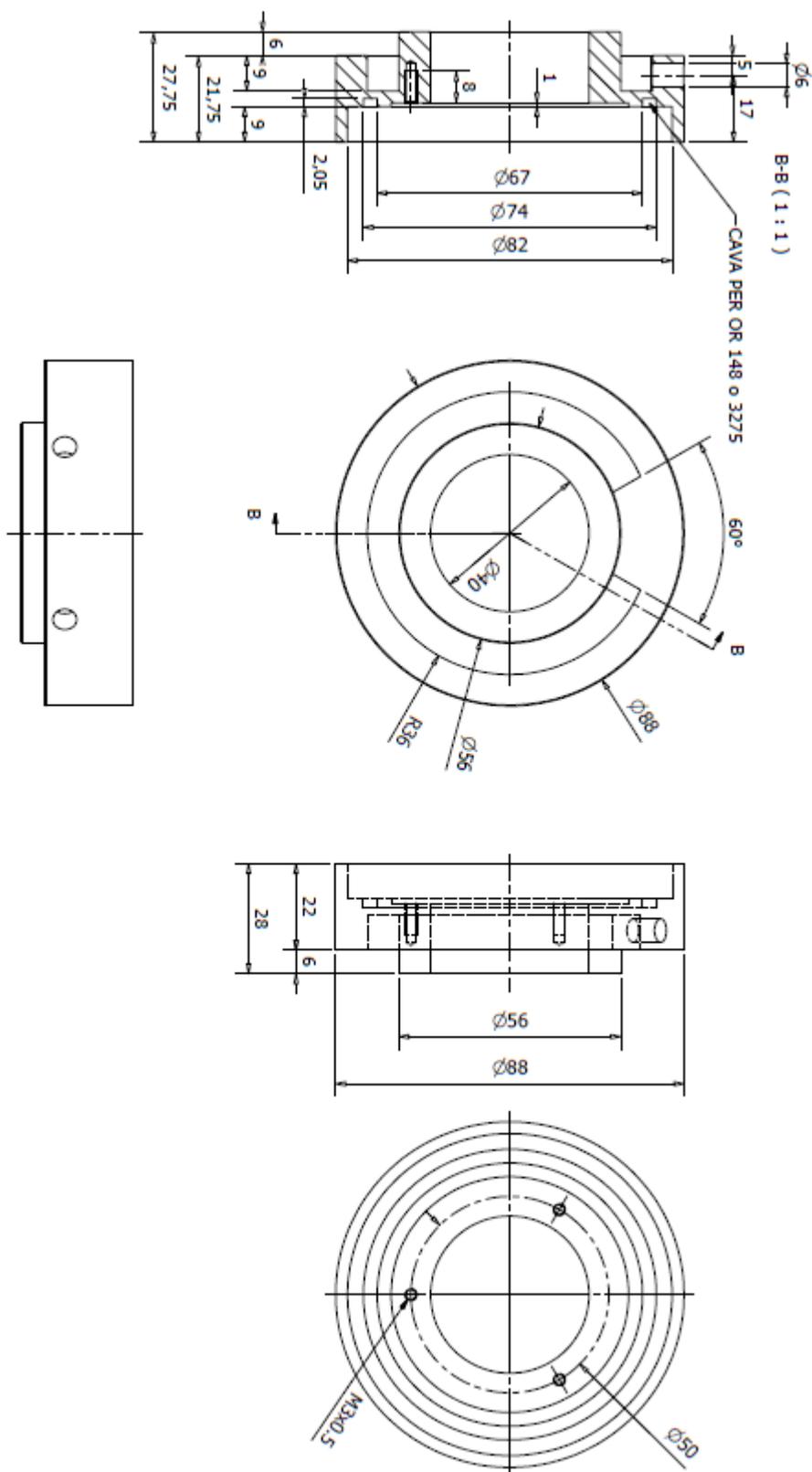


Figura 44: Alloggiamento per anodo con due fori per raddradamento.

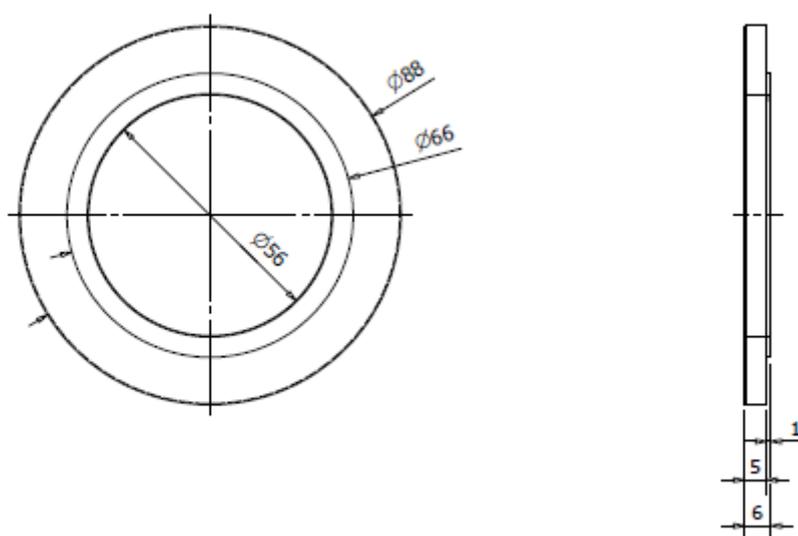


Figura 45: Flangia di chiusura per l'alloggiamenti degli anodi.

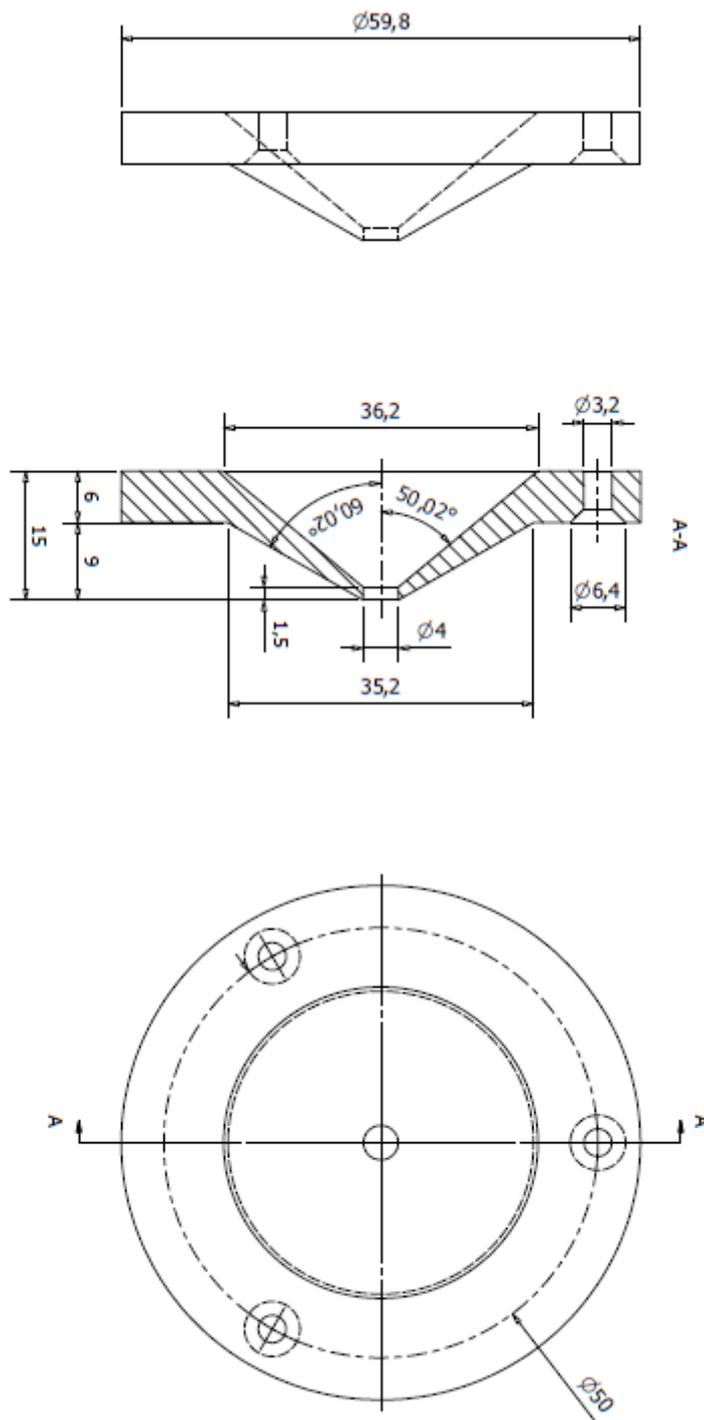


Figura 46: Cono che fa da ugello dell'anodo per limitare e convogliare la scarica e il gas.

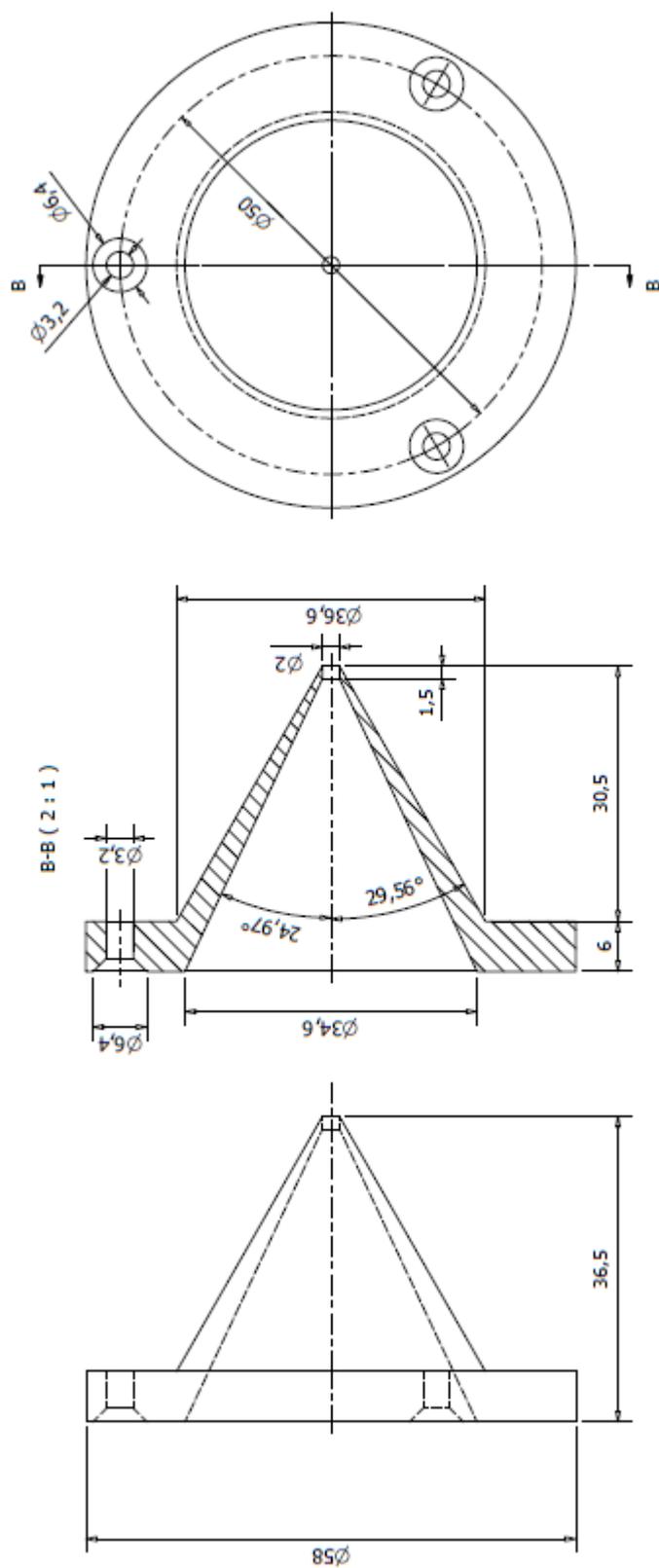


Figura 47: Cono che fa da ugello dell'anodo per limitare e convogliare ulteriormente la scarica e il gas.

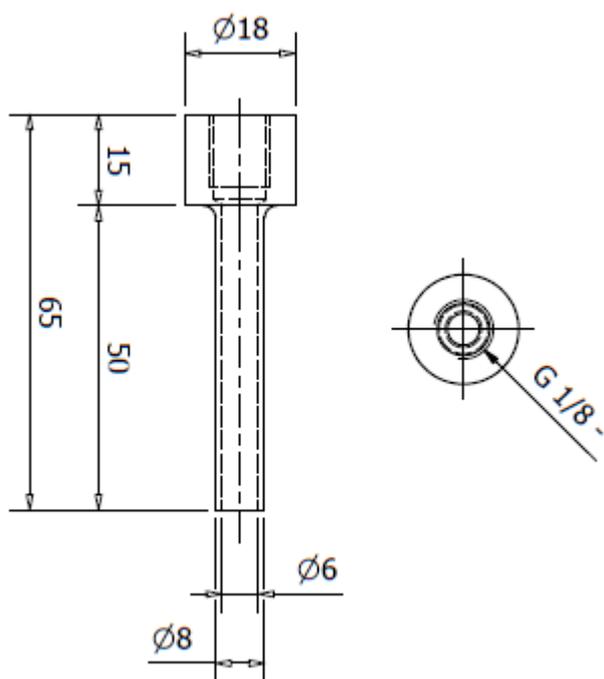


Figura 48: Tubo dritto per l'immissione dell'acqua di raffreddamento negli alloggiamenti degli anodi.

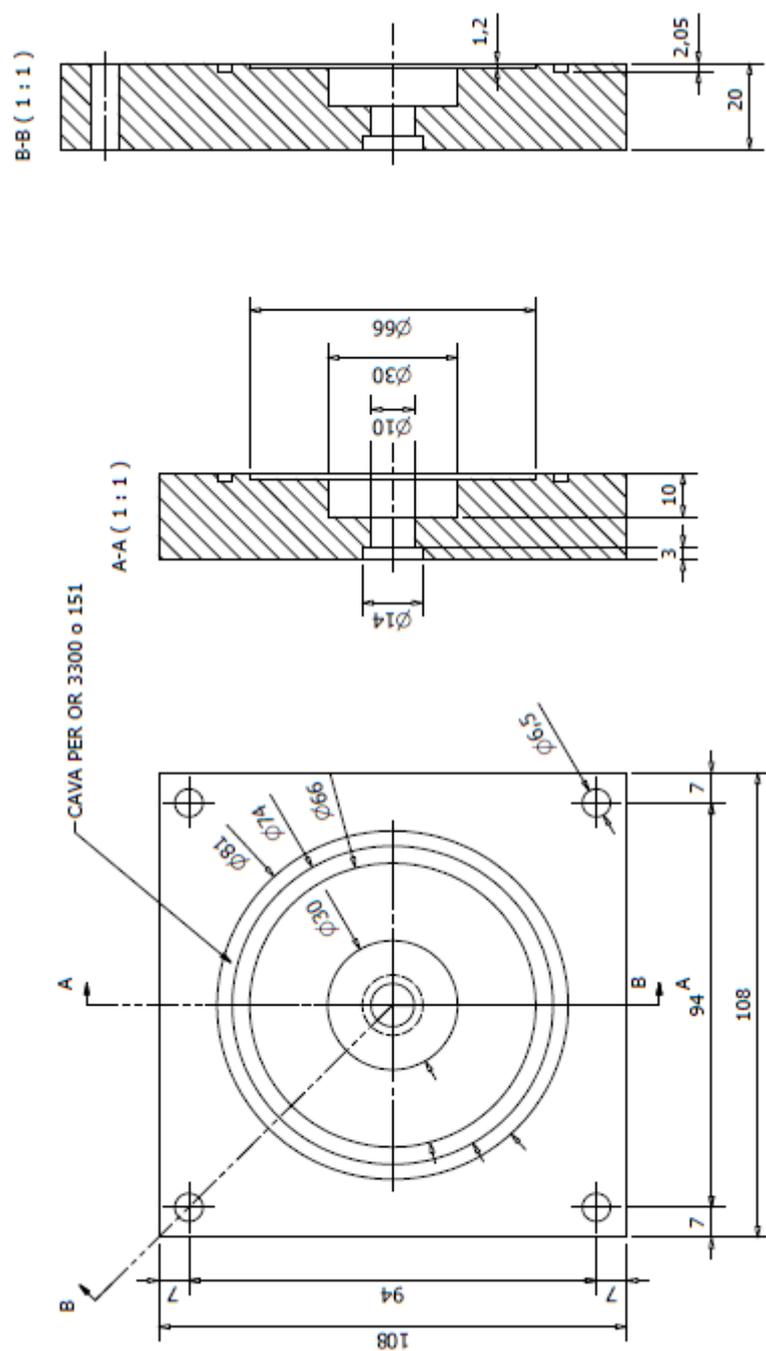


Figura 49: Flangia di chiusura della lampada con alloggio per tubo per misuratore di pressione.

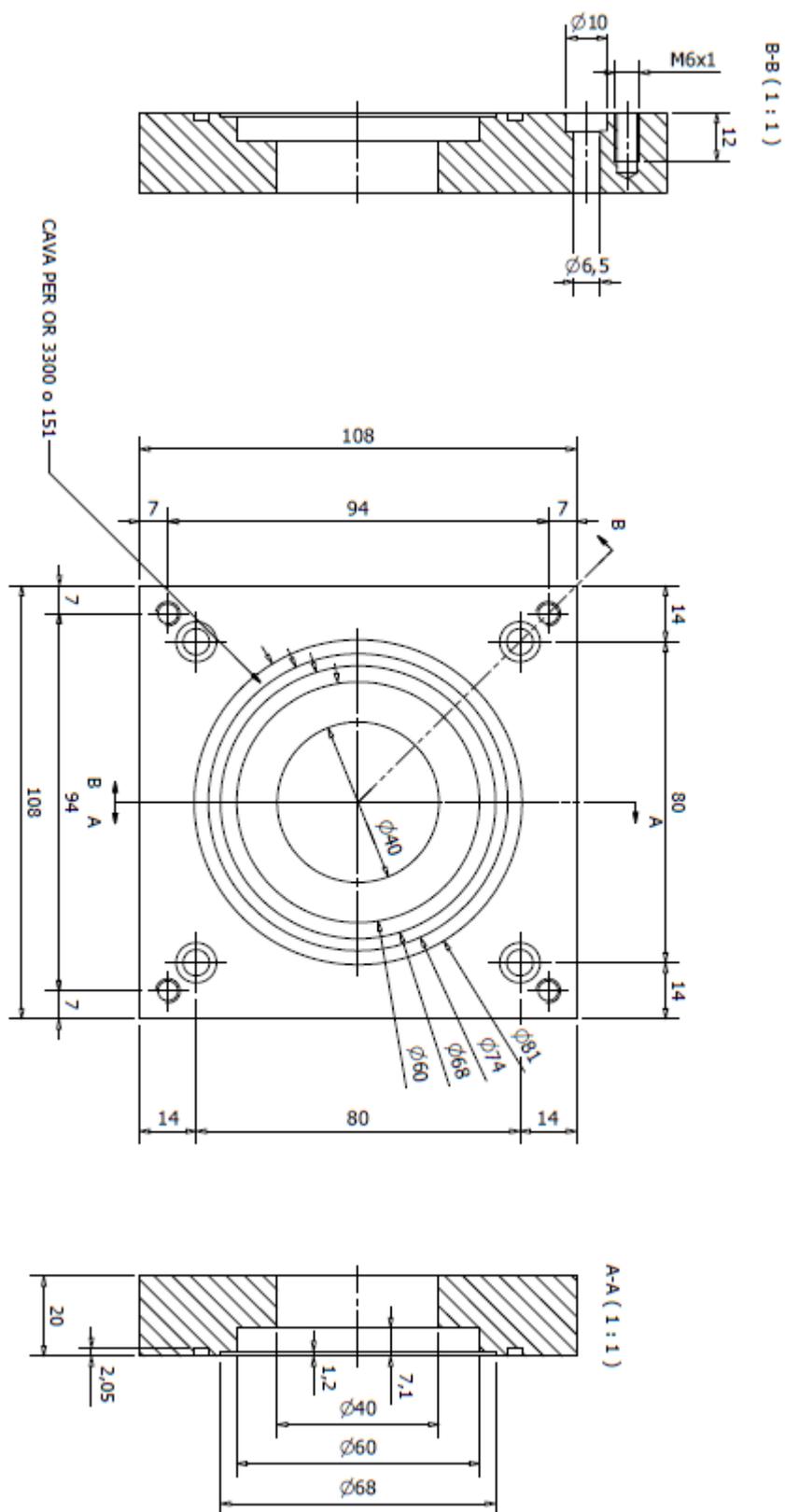


Figura 50: Flangia di chiusura per l'uscita della radiazione.

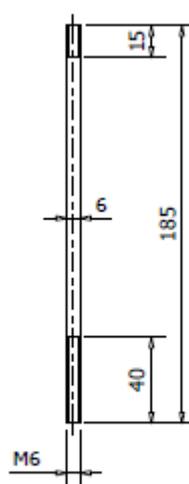


Figura 51: Prigionieri per fissaggio della lampada. Uniscono le due flange di chiusura.

B | DISEGNI DEL VECCHIO PROGETTO

Tutti i disegni presenti in questa sezione sono quelli realizzati per la progettazione della vecchia lampada hollow cathode presso il laboratorio Luxor di Padova. I disegni vengono presentati divisi in sezioni ed ognuno contiene le quotature.

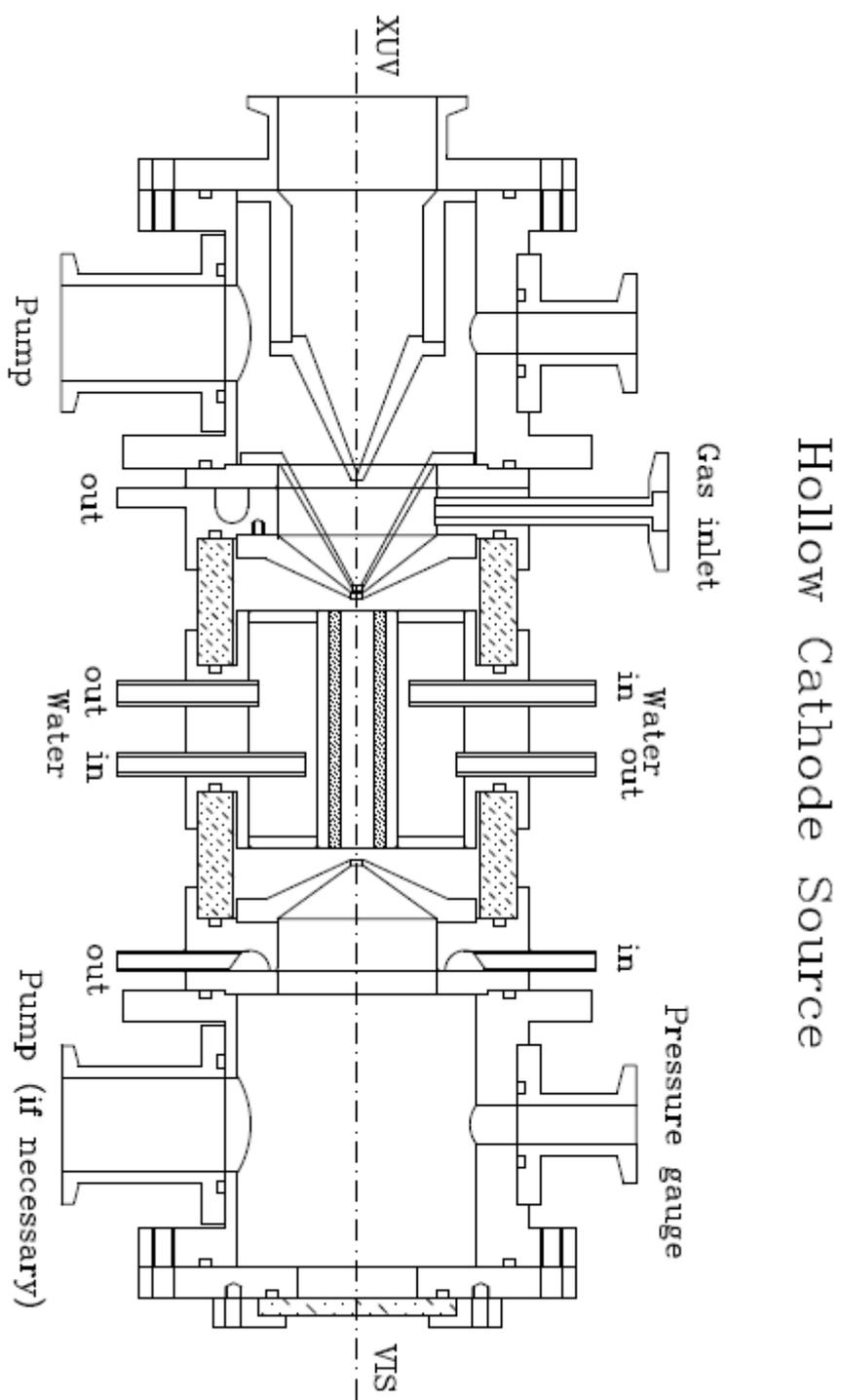


Figura 52: Sezione generale della vecchia lampada hollow cathode.

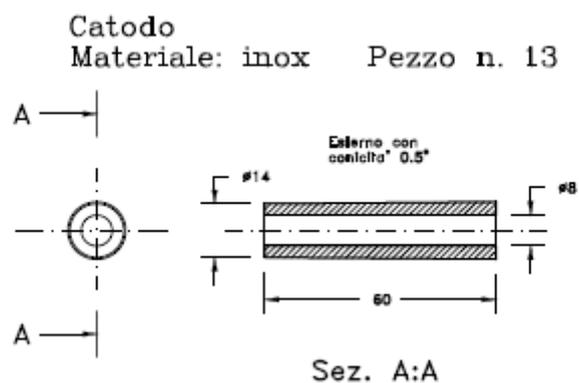


Figura 53: Parte interna in acciaio inox del catodo saldata nell'alloggiamento previsto dal pezzo 2.

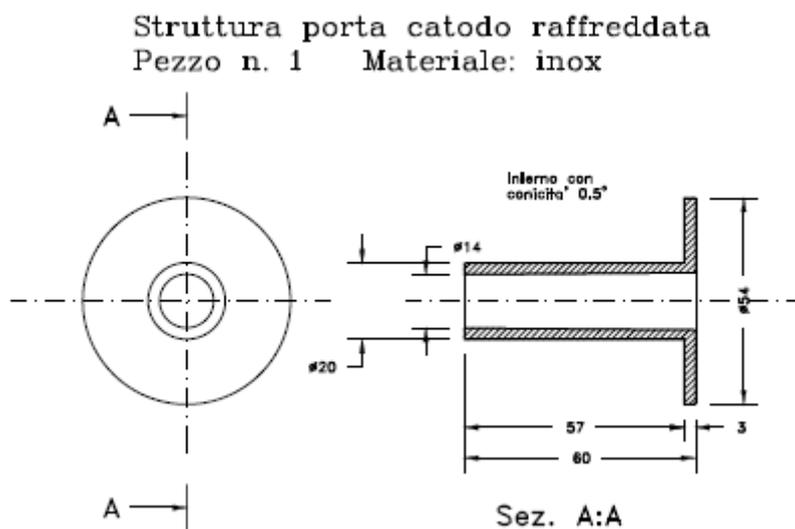


Figura 54: Parte esterna in acciaio inox del catodo, nella cavità centrale è previsto l'alloggiamento per il pezzo 1.

Struttura porta catodo raffreddata
 Pezzo n. 2 (da saldare al pezzo n. 1)
 Materiale: inox

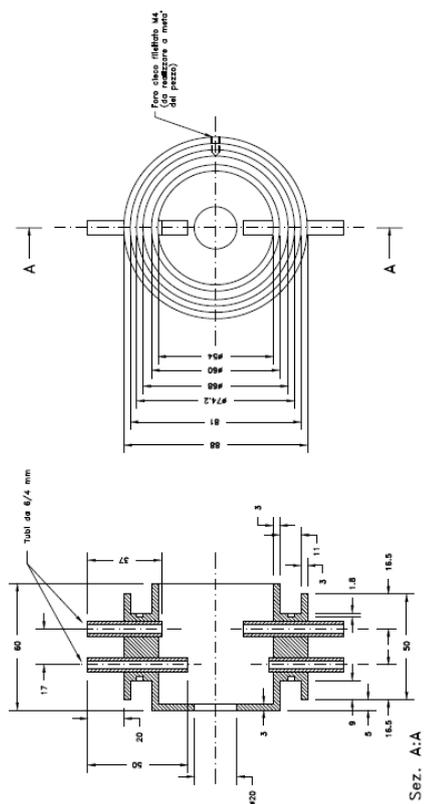


Figura 55: Alloggiamento del catodo. Si notano le coppie di tubi di andata e ritorno per l'acqua, l'alloggiamento per o-ring e vetrino in pyrex.

Flangia raffreddata (pezzo n. 3)
 Materiale: inox

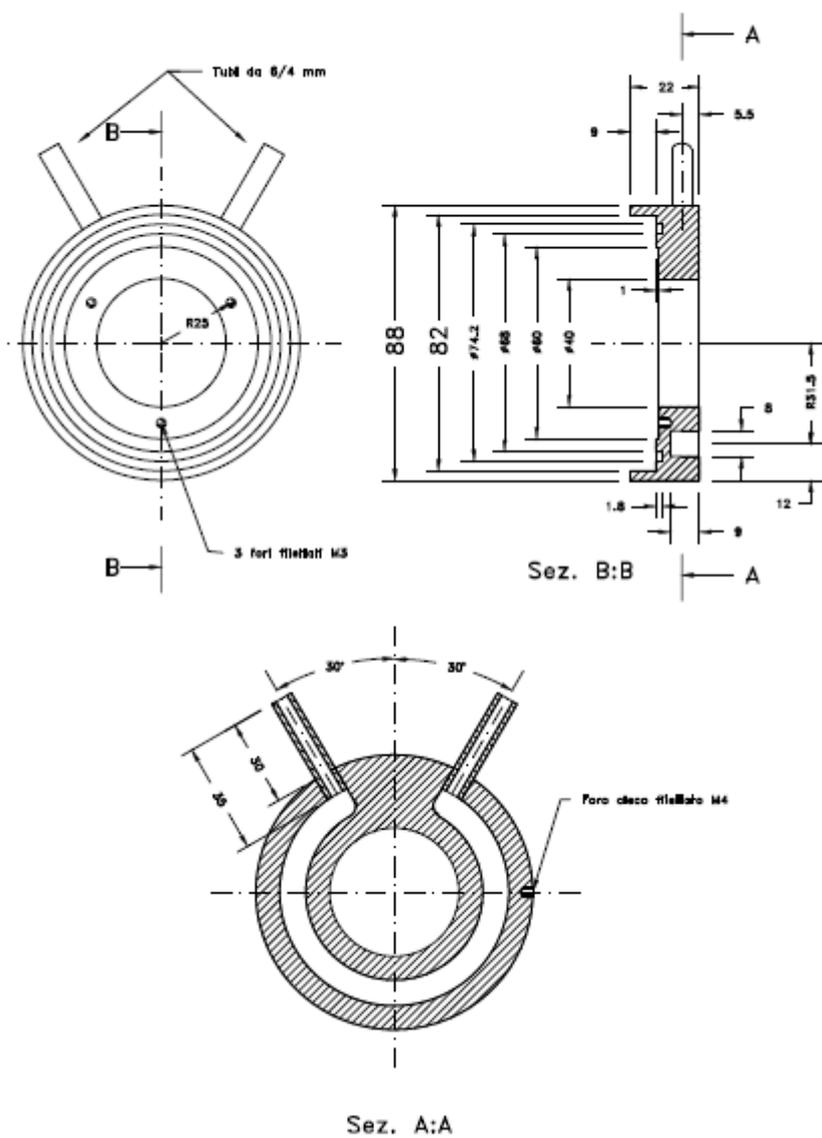


Figura 56: Flangia raffreddata con gli alloggiamenti per l'anodo, l'oring. Da saldare al pezzo 5.

Flangia di chiusura (pezzo n. 5)
da saldare al pezzo n. 3
Materiale: inox

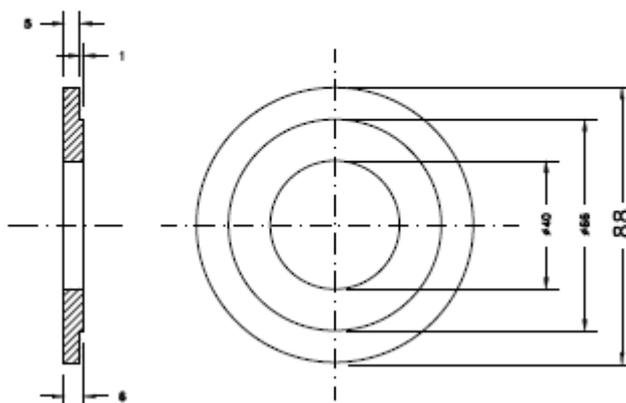


Figura 57: Flangia di chiusura da saldare sul pezzo 3.

Flangia raffreddata (pezzo n. 4)
 Uguale al pezzo n. 3 con flangia di immissione gas
 Materiale: inox

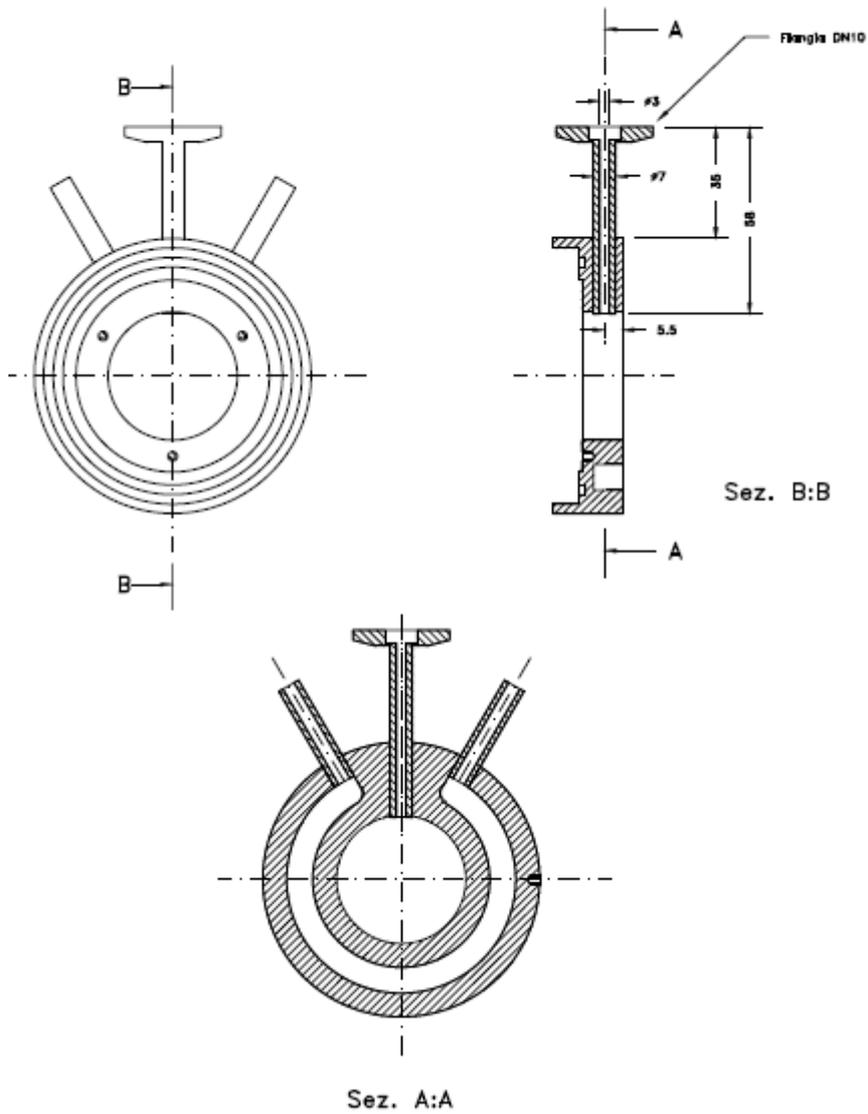


Figura 58: Flangia raffreddata con gli alloggiamenti per l'anodo, l'oring e l'immissione del gas. Da saldare al pezzo 4.

Flangia di chiusura (pezzo n. 6)
 da saldare al pezzo n. 4
 Identica al pezzo n. 5 con tre fori ciechi filettati
 Materiale: inox

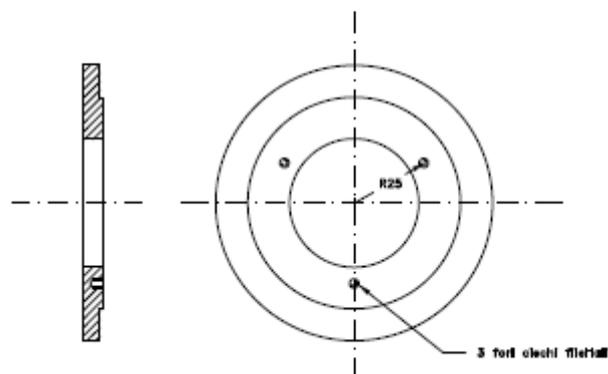
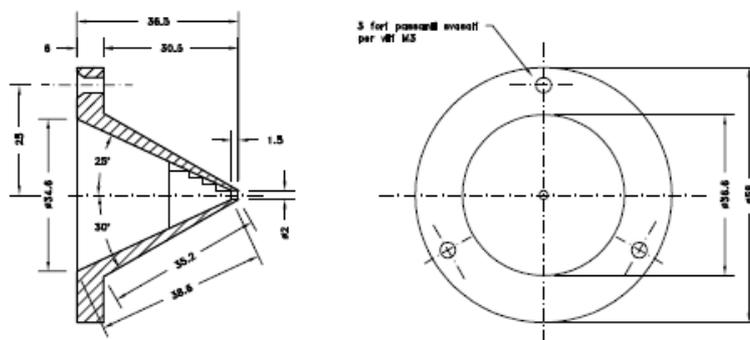
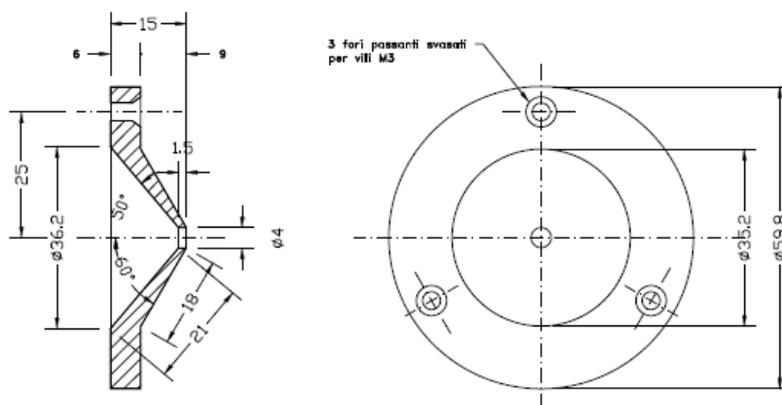


Figura 59: Flangia di chiusura da saldare sul pezzo 4.



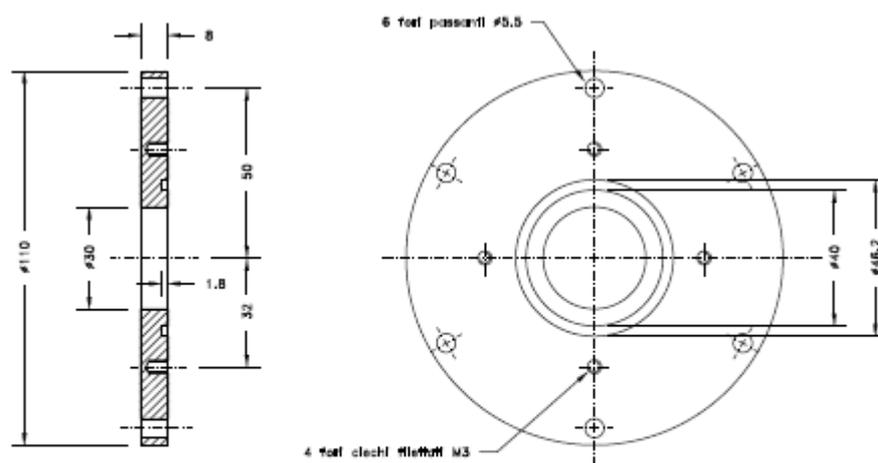
Ugello come diaframma
 Pezzo n. 8
 Materiale: Acciaio inox

Figura 60: Anodo da montare sul rispettivo alloggiamento. Da notare la seghettature interna vicino al pinhole per migliorare la realizzazione in fase di fresatura. Da montare nella parte posteriore dell'alloggiamento per limitare la scarica.



Ugello dell'anodo
 N. 2 esemplari identici
 Pezzo n. 7
 Materiale: Acciaio inox

Figura 61: Cono dell'anodo da montare nella parte anteriore dell'alloggiamento rivolta verso il catodo.



Flangia di chiusura portafinestra
 Pezzo n. 5
 Materiale: Alluminio

Figura 62: Flangia di chiusura con alloggiamento oring per il posizionamento della finestra di vetro.

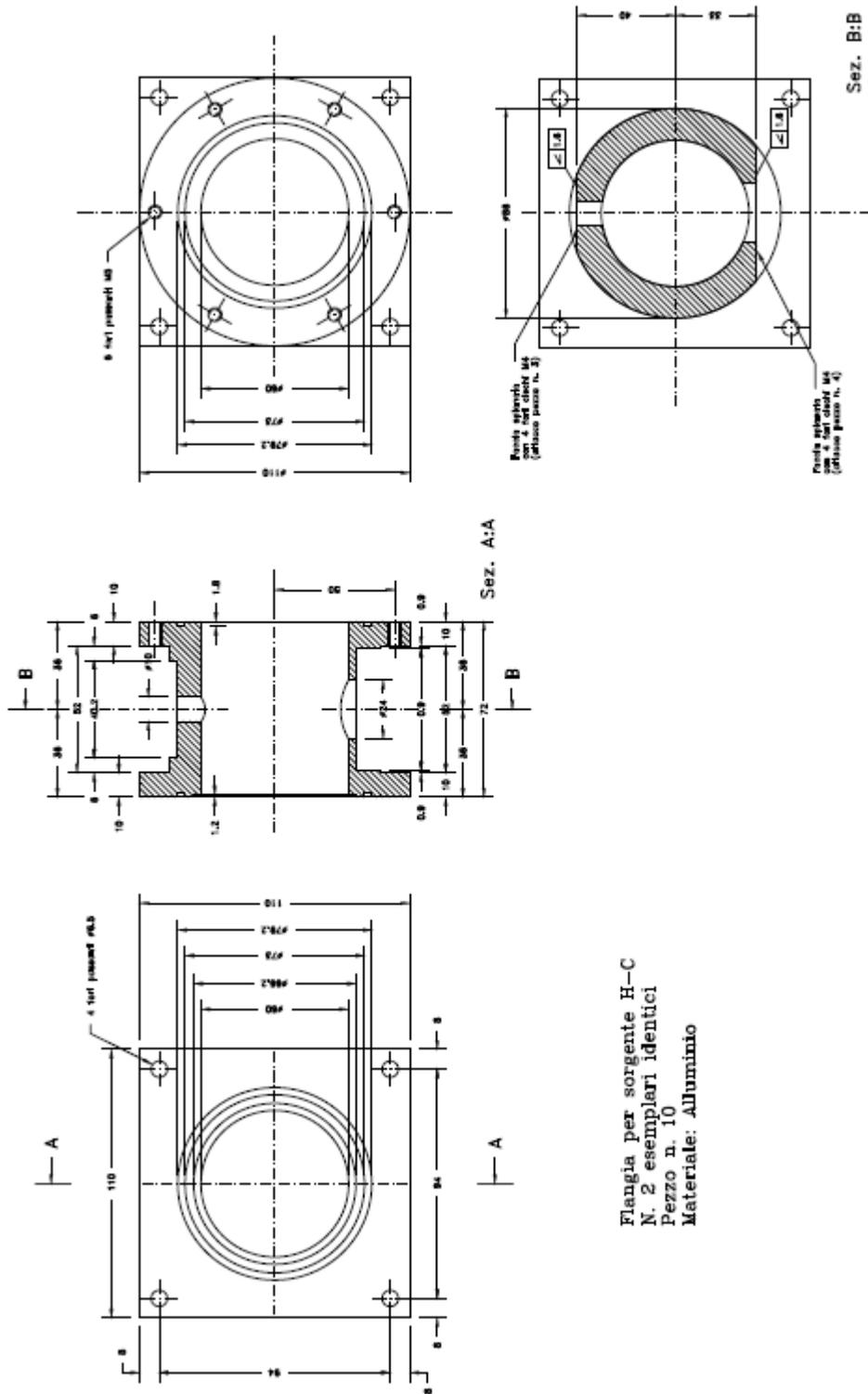


Figura 65: Camera di raccordo tra la flangia finale e l'alloggiamento dell'anodo. Sono presenti dei fori per le flange di raccordo.

C | DATA SHEET DEI COMPONENTI IMPIEGATI

Sono riportati in questo appendice i data-sheet dei componenti impiegati.

C.1 ALIMENTATORE

Caratteristiche di progetto:

- **Modello:** Glassman HV PS/PG001R1A-220;
- **Regolazione di tensione e corrente:** Possibilità di regolazione sia in corrente che in tensione manualmente attraverso manopole separate a dieci scatti presenti nel pannello frontale del master;
- **Programmazione e monitoraggio da remoto:** Regolazione in remoto per corrente e tensione. La programmazione è realizzata per entrambi da un potenziometro (usa il sistema interno di riferimento dell'alimentatore) o programmato dall'esterno da una tensione tra 0 e 10V con ritorno a terra, il tutto è già predisposto sia per l'uscita di tensione che per quella di corrente;
- **Modulatore PWM:** Permette di lavorare off line evitando l'uso di grandi trasformatori di potenza;
- **Pannelli di misura:** Sono presenti nel pannello del master e indicano tensione e corrente di uscita con un'accuratezza di 20V (2% del valore massimo cioè 1kV);
- **Efficienza:** maggiore del 75% a pieno carico che assicura una bassa dissipazione interna e una maggiore affidabilità;
- **Ripple:** l'ondulazione standard è di 0.1% quindi attorno ai 10V grazie all'impiego dei convertitori Push-pull che operano ad alta frequenza.

Le specifiche del dispositivo sono elencate qui sotto:

- **Input:** tensione di rete a 105 – 125Vrms ad una frequenza di 50 – 60Hz, singola fase e approssimativamente 15A di corrente;
- **Output:** 0 ÷ 1kV DC regolabili a intervalli di 10V, 0 ÷ 1A regolabili a intervalli di 10mA;
- **Regolazione di tensione:** sul carico meglio di $\pm 0.005\% \pm 1V$;
- **Regolazione di corrente:** migliore di 0.1mA

- **Ripple:** migliore del 0.1% della tensione nominale a pieno carico. L'ondulazione di tensione è proporzionale alla corrente di carico e decresce linearmente di 0.2%rms della tensione nominale con assenza di carico;
- **Stabilità:** 0.01% \pm 1V per ora dopo mezz'ora dall'avvio poi sale allo 0.05% \pm 2V per otto ore;
- **Coefficiente di temperatura:** 0.01%/°C;
- **Temperatura ambiente:** comprese tra -20°C e 60°C quando è attivo. altrimenti tra -40°C e 85°C ;
- **Polarità:** fissa, i moduli sono separati;
- **Protezioni:** è impedito il ripristino automatico dell'alimentatore dopo un'interruzione di linea;

Elementi nel pannello frontale:

- **AC Power:** bottone ON/OFF con segnalazione luminosa;
- **HV ON:** pulsante momentaneo con segnalazione luminosa;
- **Kilovolmetro:** 2% di accuratezza;
- **Milliamperometro:** 2% di accuratezza;
- **Controllo della tensione:** manopola a dieci scatti con blocco;
- **Controllo della corrente:** manopola a dieci scatti con blocco;

Elementi nel pannello posteriore:

- **Cavo di linea:** lunghezza circa 1.8m con 3 pin standard con collegamento a massa;
- **Output:** lunghezza cavo 1.8m, schermato, cavo di accoppiamento;
- **Terminali esterni di interlock:** l'uscita è mantenuta a zero quando la coppia di contatti esterni apre. Quando la coppia di contatti esterni è chiusa il dispositivo può lavorare normalmente;
- **Terminali di lettura da remoto di corrente e tensione:** fornisce un segnale compreso nell'intervallo 0 – 10V DC con impedenza di 10K Ω ;
- **Controllo di tensione e corrente da remoto:** tre terminali per il potenziometro e per il controllo di tensione da remoto con riferimento a terra.
- **Protezioni:** fusibili sul pannello posteriore.

Seguono alcuni disegni dell'alimentatore.

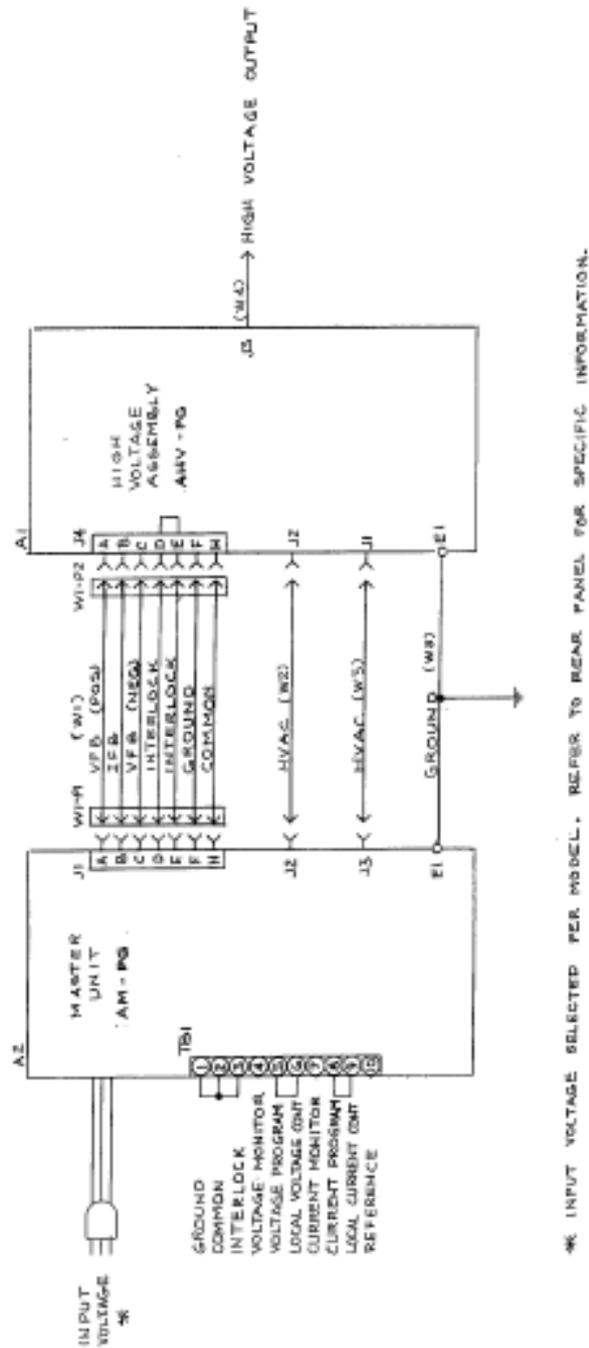


Figura 68: Schema generale dell'alimentatore presente in laboratorio. È composto dal master a sinistra al quale è collegato lo slave. [Gla, 1984]

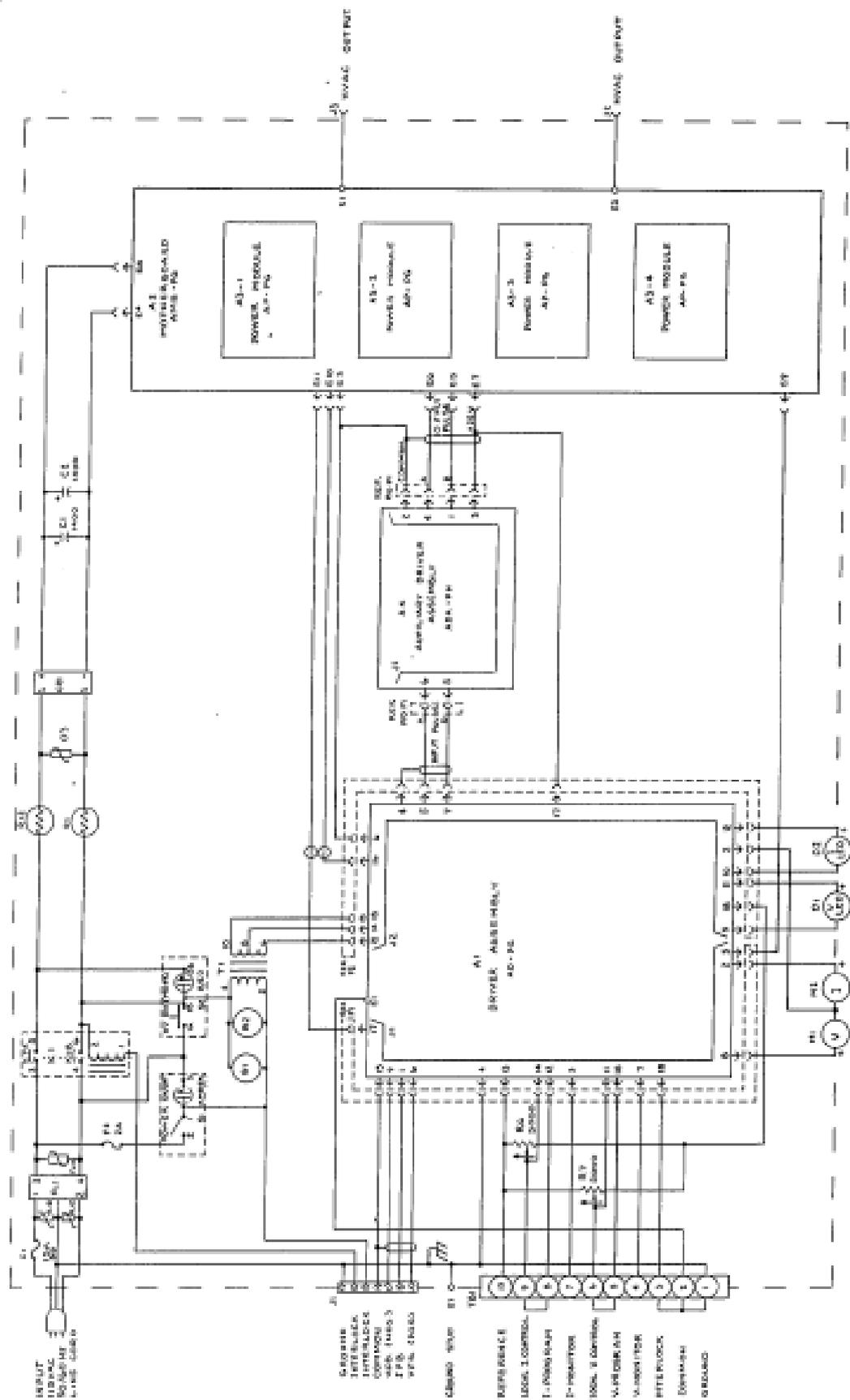


Figura 69: Rappresentazione schematica del master dell'alimentatore. Lo slave è connesso al master attraverso i due cavi *hv output* [Gla, 1984]

RINGRAZIAMENTI

Molte persone mi hanno sostenuto e aiutato nella stesura di questa tesi e nel lavoro compiuto in questi mesi al Luxor.

La prima persona da ringraziare é la prof.ssa Pelizzo, per la fiducia che mi ha sempre dimostrato.

L'importanza del progetto per il futuro, ha richiesto una figura con una grande competenza in materia. La dott.ssa Paola Zuppella in questi mesi ha rappresentato per me una persona su cui poter far sempre affidamento e da ringraziare per la sua disponibilità a consigliarmi e aiutarmi.

Ringrazio Alain J. Corso per tutti i consigli che mi ha fornito, per tutte le spiegazioni tecniche riguardante il campo della mia tesi, e non, e infine per tutti i momenti passati a chiacchierare del piú e del meno.

Un progetto necessita anche di praticit  derivata dall'esperienza accumulata negli anni di utilizzo degli strumenti, ed é per questo che ringrazio il dott. Gianni Monaco.

Il lavoro ha richiesto di essere ben organizzato, con scadenze precise e riunioni iniziali per capire le scelte da seguire. Per questo é stato di fondamentale aiuto il dott. Fabio Frassetto.

Un grazie anche a Vanessa Polito, per aver condotto il test della lampada.

Si ringraziano anche le persone dell'officina del Dipartimento di Fisica dell'Universit  di Padova e della ditta Fizner SRL che hanno dato consigli utili a raggiungere migliorare il progetto.

Padova, 31 marzo 2011

M. R.

BIBLIOGRAFIA

- (1984), *Instruction manual PG series*, Glassman High Voltage, Inc., Whitehouse Station NJ.
- (2002), «Amptektron MD-501 electron and ion detector», URL <http://www.amptek.com/md501.html>.
- (2010), «missione Bepi Colombo», URL <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=30>.
- (2010), «NIST», URL <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>.
- A.J., C. (2010), «Nanostructured optical coatings for solar physics observations from space», .
- ALBERTS I.L., R. A., BARRATT I.S. (2010), «Hollow cathode effect in a fluorescent lamps: a review», *Journal of display technology*, (2).
- BAGUER N., G. R., BOGAERTS A. (2002), «Hybrid model for a cylindrical hollow cathode glow discharge and comparison with experiments», *Spectrochimica Acta*.
- BOGAERTS A., G. R. V. D. M. J., NEYTS E. (2001), «Gas discharge and their applications», *Spectrochimica Acta*, (57).
- CHASSEFIÈRE E., G. J., MARIA J.L: (2008), «Phebus: A double ultraviolet spectrometer to observe Mercury's exosphere», *Planetay and space science*.
- GOLDSTON J., R. P. (1995), *Introduction to plasma physics*, Institute of Physics Publishing, London.
- H.R., G. (1995), *Principles of plasma spectroscopy*, Cambridge university press, Cambridge.
- JONES R.E., W. R. (1964), «Factors controlling the performance of cascade rectifier circuits», *Proc. IEE*, vol. 111.
- LIEBERMAN M.A., L. A. (1994), *Principles of plasma discharges and materials processing*, John Wiley and Sons, New York.
- LITTLE P.F., v. E. A. (1954), «The hollow cathode effect and the theory of glow discharge», *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*.
- M., B. (2010), «Optical characterization of multilayer coating samples», .
- MALESANI L., S. G., MATTAVELLI P. (2006), *Dispense del corso di elettronica industriale*, Libreria Progetto, Padova.
- SALEAH B.E.A, T. M. (2007), *Fundamentals of Photonics*, Wiley & CO., Hoboken NJ.

S.K., K. (1963), «Resistivity in a fully ionized gas», *Proceedings of the Physical Society*.