



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA NUMERO	101998900707695
Data Deposito	05/10/1998
Data Pubblicazione	05/04/2000

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
H	01	L		

Titolo

CIRCUITO IN TECNOLOGIA CMOS PER LA GENERAZIONE DI UN RIFERIMENTO IN CORRENTE.

Descrizione dell'invenzione avente per titolo:

"CIRCUITO IN TECNOLOGIA CMOS PER LA GENERAZIONE DI UN RIFERIMENTO
IN CORRENTE "

a nome CSELT - Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni S.p.A., Via G. Reiss
Romoli 274, 10148 Torino, nazionalità italiana.

Inventori: Emanuele BALISTRERI

Marco BURZIO

Domanda N. **T 0 98 A 0 0 0 8 3 1**

Depositata il **1° 5 OTT. 1998**

CSELT
Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni S.p.A.

=.=.=.=.=

La presente invenzione si riferisce ai circuiti integrati analogici in tecnologia CMOS, e più in particolare riguarda un circuito per la generazione di un riferimento in corrente da utilizzare all'interno di uno di tali circuiti integrati.

I generatori di riferimenti in corrente sono un elemento base dei circuiti integrati analogici, dove vengono usati come sorgenti di corrente di polarizzazione stabile per oscillatori, amplificatori, circuiti ad aggancio di fase (PLL), ecc.

Un generatore di riferimento in corrente deve essere per quanto possibile indipendente sia dal processo di fabbricazione (in modo che esemplari diversi del generatore abbiano comportamenti per quanto possibile simili), sia dalle variazioni tecnologiche (in modo che sia possibile adattarsi all'evoluzione della tecnologica), sia dalle condizioni di lavoro del singolo circuito (in particolare dalla tensione di alimentazione e dalla temperatura). Un'altra esigenza, tipica per i generatori realizzati in tecnologia CMOS, è che il circuito non faccia uso di elementi particolari, quali resistenze diffuse o transistor bipolari a giunzione, che danno origine a complicazioni inutili del lay-out del circuito integrato. L'impiego di elementi quali transistor bipolari a

giunzione renderebbe inoltre il circuito estremamente sensibile alle variazioni tecnologiche.

I generatori di riferimento in corrente si basano sul principio di uguagliare la caduta di tensione ai capi di una coppia di elementi collegati fra loro e aventi caratteristiche corrente-tensione tali da presentare un punto di incrocio stabile (punto di equilibrio); un circuito di reazione rileva gli scostamenti dal punto di equilibrio e tende a riportarvi il punto di lavoro del generatore.

Un primo esempio di realizzazione di generatore di riferimento in corrente in tecnologia CMOS è descritto nel libro "CMOS Analog Circuit Design", di P. E. Allen e D. R. Holberg, Ed. Holt, Rinehart and Winston, New York, USA, 1987 (si veda il cap. 5.5, pagg. 240 - 251). Questo generatore usa un circuito a specchio di corrente per generare due correnti sostanzialmente uguali che vengono fatte passare rispettivamente in un primo transistor e in una resistenza integrata. Un ulteriore transistor funge da elemento di reazione. L'unità comprende anche un circuito di prepolarizzazione (start up) che evita che il circuito si porti in un secondo punto di equilibrio rappresentato dal punto (0,0) della caratteristica corrente-tensione. Questo generatore ha il pregio della semplicità realizzativa, però ottiene solo l'indipendenza dalla tensione di alimentazione ed è molto sensibile alle fluttuazioni del processo tecnologico e alle variazioni di temperatura.

E' già stato proposto (si veda l'articolo "CMOS Current Reference Without Resistance" di Henri J. Oguey e Daniel Aebischer, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 32, n. 7, luglio 1997, pagg. 1132 - 1135) di sostituire la resistenza integrata con un secondo transistor dello stesso tipo del primo: si ottiene una minor sensibilità alla temperatura ($\pm 10\%$) ma si ha ancora una sensibilità molto forte alle fluttuazioni di processo e di tensione di alimentazione, che fan sì che le fluttuazioni

complessive della corrente generata siano alquanto grandi (circa $\pm 30\%$, secondo quanto riportato nell'articolo). Inoltre il circuito ha dimensioni molto ampie (dimensioni lineari di alcune centinaia di micron).

Secondo l'invenzione si fornisce invece un circuito che presenta un'elevata indipendenza sia dal processo tecnologico, sia dalle variazioni di tensione di alimentazione, sia ancora dalle variazioni di temperatura.

Il circuito secondo l'invenzione comprende almeno una prima unità di generazione di un riferimento in corrente, comprendente:

- un primo e un secondo elemento aventi rispettive caratteristiche corrente-tensione con andamento tale da presentare un punto di intersezione a cui corrisponde un primo riferimento in corrente, entrambi gli elementi essendo realizzati con componenti attivi e il primo elemento comprendendo un primo transistor alla cui uscita è presente il riferimento,
- mezzi per iniettare una stessa corrente in detti due elementi,
- un circuito di prepolarizzazione, per portare l'unità a operare in corrispondenza di un punto di lavoro rappresentato dal punto di intersezione delle caratteristiche corrente-tensione di detti due elementi e
- un circuito di reazione per mantenere il punto di lavoro del circuito in corrispondenza di detto punto di intersezione al variare delle condizioni operative, ed è caratterizzato dal fatto che
- detto primo transistor è un transistor con basso guadagno;
- detto secondo elemento comprende un secondo e un terzo transistor collegati in serie, i quali hanno lo stesso tipo di drogaggio del primo transistor e presentano guadagno molto maggiore di quello del primo transistor;
- i mezzi di iniezione sono atti a iniettare una corrente tale da portare il primo

transistor a operare in condizioni di saturazione spinta e il secondo e terzo transistor a operare in condizioni di inversione debole, e

- il circuito di reazione comprende un amplificatore differenziale che riceve ai suoi ingressi la tensione presente ai capi di detti primo e secondo elemento e fornisce a detti mezzi di iniezione un segnale di controllo tale da mantenere il circuito in detto punto di lavoro.

Secondo un'altra importante caratteristica dell'invenzione, il circuito comprende inoltre una seconda unità di generazione di un riferimento in corrente, avente la stessa struttura della prima e comprendente un primo e secondo elemento con rispettive caratteristiche corrente-tensione tali che il punto di intersezione corrisponda a un valore di corrente diverso da quello delle caratteristiche del primo e secondo elemento della prima unità, e dette due unità sono collegate a mezzi per la combinazione lineare delle rispettive correnti.

A maggior chiarimento si fa riferimento ai disegni allegati, in cui:

- la fig. 1 è uno schema a blocchi di principio del circuito dell'invenzione;
- la fig. 2 è uno schema circuitale parziale,
- le figure 3 - 7 sono grafici delle caratteristiche dei componenti che illustrano il funzionamento dell'invenzione, in diverse condizioni di processo e di lavoro, e
- la figura 8 è un grafico delle prestazioni dell'invenzione

Con riferimento alla fig. 1, il circuito per la generazione di un riferimento in corrente secondo l'invenzione comprende essenzialmente una coppia di unità G1, G2, identiche come schema ma destinate a generare riferimenti diversi, entrambi sostanzialmente indipendenti da fluttuazioni del processo di fabbricazione e da variazioni della tensione di alimentazione, e un circuito CL atto a effettuare una combinazione lineare delle uscite delle due unità G1, G2 per realizzare l'indipendenza

dalla temperatura, come si descriverà in seguito.

Come indicato in dettaglio per l'unità G1, ciascuna delle due unità comprende: una coppia di sensori S1, S2 (con il termine di "sensori" si indicheranno nel seguito gli elementi che determinano il punto di lavoro del circuito, rappresentato dal punto di intersezione delle rispettive caratteristiche corrente-tensione) collegati a uno specchio di corrente SP destinato a iniettare nei due sensori S1, S2 una stessa corrente; un amplificatore differenziale AD, che costituisce il circuito di reazione ed è destinato a generare un segnale in corrente da fornire allo specchio SP per mantenere le unità nel punto di equilibrio al variare delle condizioni operative (in particolare della tensione di alimentazione); e un circuito di prepolarizzazione SU che inietta nel sensore S2, fintanto che la tensione ai capi del sensore stesso è inferiore a un certo valore minimo, una corrente tale da impedire al circuito di portarsi nel secondo punto di equilibrio rappresentato da un valore nullo della corrente e della tensione.

Come si vede meglio nello schema circuitale di fig. 2, il sensore S1 è costituito da un transistor unico T1 (in particolare di tipo N), come nella tecnica nota, mentre il secondo sensore S2 è costituito da una coppia di transistori T2, T3, dello stesso tipo di T1, in serie fra loro. E' essenziale che il transistor T1 abbia caratteristiche di transconduttanza (o guadagno) assai diverse da quelle dei transistor T2, T3, in modo tale che esista e sia effettivamente raggiungibile un punto di equilibrio del circuito diverso dal punto (0,0) delle caratteristiche corrente-tensione. In particolare, il transistor T1 ha transconduttanza molto bassa, mentre i transistor T2, T3 hanno transconduttanza molto alta. Un possibile andamento qualitativo delle caratteristiche dei due sensori è rappresentato nelle Figure 3, 4, dove C1, C2 sono le caratteristiche rispettivamente del sensore S1 e del sensore S2. A causa della disposizione in serie dei transistor stessi si vede che la coppia di transistor T2, T3 ha una soglia

sostanzialmente doppia di quella del transistor T1 e, data la diversa pendenza delle caratteristiche, esiste effettivamente un punto di equilibrio rappresentato dal punto di incrocio delle curve C1, C2. Come ben noto al tecnico, nella realizzazione come circuito integrato le diverse caratteristiche sono ottenibili mediante un diverso rapporto larghezza/lunghezza dei transistor. Preferibilmente, il rapporto larghezza/lunghezza del transistor T1 è il reciproco di quello dei transistor T2, T3, e il guadagno del transistor T1 è l'inverso di quello di T2 o T3. Con I1 è indicata la corrente corrispondente al punto di equilibrio.

Il transistor T1 e la coppia di transistor T2, T3 sono realizzati nel circuito integrato molto vicini fra loro. Essendo i transistor dello stesso tipo questo garantisce una buona indipendenza delle caratteristiche dal processo tecnologico. E' infatti intuibile che qualsiasi fluttuazione nei risultati del processo tecnologico influirà in egual misura sui due sensori: l'analisi delle prestazioni di circuiti realizzati in tempi diversi ha dimostrato che l'effetto delle fluttuazioni è in pratica uno spostamento delle caratteristiche dei sensori stessi parallelamente a se stesse, tale da lasciare sostanzialmente inalterata la corrente I1 relativa al punto di equilibrio, come si può apprezzare da un confronto tra le figure 3, 4, che si riferiscono rispettivamente a un processo che dà origine a un circuito "lento" e a un processo che dà origine a un circuito "veloce". Analogamente, anche un'evoluzione dei processi tecnologici di fabbricazione influenzerà in modo analogo i due sensori.

L'amplificatore differenziale AD è costituito dall'insieme dei transistor da T4 a T14 (di cui i transistor da T4 a T8, T13, T14 di tipo N e gli altri di tipo P), come è chiaro per il tecnico. I transistor di AD sono scelti in modo da fornire un guadagno tale da stabilizzare il punto di lavoro con precisione elevata, p. es. dell'ordine del millivolt. Al gate dei transistor T4, T5 è applicata la tensione presente ai capi dei due sensori

S1 e S2. Il segnale in corrente rappresentativo della differenza viene prelevato dal nodo N1 a cui sono collegati gli elettrodi di drain dei transistor T12 e T13 e viene fornito allo specchio di corrente SP costituito dai transistor T15, T16, T17, di tipo P. Il transistor T14, incluso anch'esso in AD, ha unicamente scopi di stabilizzazione.

Il transistor T20 costituisce il circuito di prepolarizzazione SU, mentre i transistor T19, T18 sono transistor di polarizzazione del circuito SU e dell'amplificatore differenziale AD.

Un generatore come G1 garantisce una buona insensibilità alle variazioni del processo di realizzazione del circuito integrato e dell'alimentazione, come detto sopra, ma non è in grado di assicurare la buona indipendenza dalla temperatura. Infatti, data la struttura dei due sensori, il transistor T1 lavorerà in generale in condizioni di saturazione spinta mentre i due transistor T2, T3, collegati in serie, lavorano in una zona di inversione debole. Di conseguenza il comportamento dei due sensori al variare della temperatura è diverso e, in particolare, la caratteristica corrente-tensione del sensore S1 tende a diventare meno pendente al crescere della temperatura tendendo ad abbassare il punto di intersezione e quindi la corrente di riferimento, mentre la caratteristica del sensore S2 presenta uno slittamento verso sinistra che accentua l'abbassamento del punto di lavoro. In queste condizioni si hanno fluttuazioni della corrente che è impossibile compensare. Questo si vede chiaramente dal confronto tra le Figure 5 e 6, che mostrano l'andamento delle caratteristiche dei transistor dei sensori S1, S2 rispettivamente a bassa temperatura (p. es. 0°, curve C1₀, C2₀) e ad alta temperatura (p. es. 80°, curve C1₈₀, C2₈₀) e i rispettivi punti di equilibrio I₀, I₈₀.

Come detto sopra, la combinazione lineare dei riferimenti in corrente generati da due unità G1, G2 (fig. 1) è la caratteristica dell'invenzione che consente di

ottenere l'indipendenza dalla temperatura. Per questo scopo la seconda unità G2, (che è realizzata secondo lo stesso schema circuitale di G1 e quindi non è stata rappresentata in dettaglio), deve impiegare sensori i cui transistor abbiano valori del rispettivo guadagno diversi da quelli dei transistor omologhi di G1 e tali che la corrente I2 sia diversa da I1 sia come valore sia come comportamento al variare della temperatura. In un esempio preferito di realizzazione dell'invenzione, i transistor T1, T2 (o T3) del generatore G1 avevano un rapporto di guadagni di 1:400, mentre i transistor corrispondenti del generatore G2 avevano un rapporto di guadagni di 1:100; inoltre la diminuzione di I2 al crescere della temperatura era maggiore di quella di I1, come si vede in Fig. 7. In queste condizioni, il circuito CL può effettuare una combinazione lineare delle due correnti in modo tale che, indicando p. es. con I1', I2' le correnti generate dalle due unità G1, G2 all'estremo superiore dell'intervallo di temperature previsto, con I1'', I2'' le correnti generate dalle due unità G1, G2 all'estremo inferiore dell'intervallo e con I1, I2 le correnti generate a valore di temperatura generico T nell'intervallo considerato, la corrente Ir fornita dal circuito soddisfi la condizione

$$I_r = K1'I1' - K2'I2' = K1'I1' - K2'I2' = K1'I1 - K2'I2 = K$$

dove K è una costante.

Se si considera lineare l'andamento della temperatura nell'intervallo, ponendo $I1'' = \alpha I1'$ e $I2'' = \beta I2'$ (con $\alpha, \beta > 1$) è immediato vedere che la condizione di cui sopra è soddisfatta dai valori $K1 = \frac{\beta - 1}{\beta - \alpha}$ e $K2 = \frac{\alpha - 1}{\beta - \alpha}$. In realtà, il valore di Ir determinato con questi coefficienti sarà approssimativamente costante, ma non esattamente costante, dal momento che l'andamento della corrente dei transistor con la temperatura è lineare solo in prima approssimazione e solo in un certo intervallo di temperature (tipicamente 20° - 80°), come si vede in fig. 7.

CSELT
Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni S.p.A.

Prove effettuate hanno dimostrato che il generatore secondo l'invenzione offre una buona indipendenza dalla temperatura in un intervallo fra -40°C e $+135^{\circ}\text{C}$: i risultati delle prove, per $K1 \cong 6,5$ e $K2 \cong 17,3$ sono riportati in fig. 8 dove si vede che le fluttuazioni dovute alla temperatura sono dell'ordine di $\pm 5\%$. Le stesse prove hanno mostrato che, nelle condizioni peggiori, le variazioni di processo e le variazioni di tensione possono contribuire per un ulteriore $\pm 10\%$ alle fluttuazioni di I_r : è evidente il miglioramento rispetto alla tecnica nota.

Ritornando alla fig. 2, il circuito di combinazione lineare CL è costituito dai transistor T21...T25. I transistor T21, T22 costituiscono, rispettivamente con il transistor T1 e il transistor omologo in G2, due specchi di corrente che forniscono le correnti $K1I1$, $K2I2$. I transistor T23, T24, di tipo P, costituiscono un ulteriore specchio di corrente con rapporto di moltiplicazione unitario che quindi fornisce nuovamente la corrente $K2I2$. Gli elettrodi di drain di T21 e di T24 sono collegati assieme e costituiscono un nodo di sottrazione N2 del circuito di combinazione lineare. Infine il transistor T25, che ha gli elettrodi di gate e di drain collegati al nodo N2, costituisce il primo stadio di specchi di corrente che replicano la corrente generata dal circuito descritto in modo da fornirla ai singoli dispositivi di utilizzazione.

E' evidente che quanto descritto è dato unicamente a titolo di esempio non limitativo, e che varianti e modifiche sono possibili senza uscire dal campo di protezione dell'invenzione. In particolare, è possibile adottare uno schema circuitale complementare, sostituendo i transistor P con transistor N e viceversa e scambiando tra loro le alimentazioni.

Centro Studi e Laboratori
CELT
Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni S.p.A.

Rivendicazioni

1. Circuito in tecnologia C-MOS per la generazione di un riferimento in corrente, comprendente almeno una prima unità (G1) destinata a generare un primo riferimento in corrente e comprendente:

- un primo e un secondo elemento (S1, S2) aventi rispettive caratteristiche corrente-tensione con andamento tale da presentare un punto di intersezione a cui corrisponde detto primo riferimento in corrente (I1), entrambi gli elementi essendo realizzati con componenti attivi e il primo elemento (S1) comprendendo un primo transistor (T1) alla cui uscita è presente il primo riferimento (I1),
- mezzi (SP) per iniettare una stessa corrente in detti due elementi (S1, S2),
- un circuito di prepolarizzazione (SU), per portare l'unità a operare in corrispondenza di detto punto di intersezione delle caratteristiche corrente-tensione di detti due elementi (S1, S2), e
- un circuito di reazione (AD) per mantenere il punto di lavoro del circuito in corrispondenza di detto punto di intersezione al variare delle condizioni operative,

caratterizzato dal fatto che

- detto primo transistor (T1) è un transistor con basso guadagno,
- detto secondo elemento (S2) comprende un secondo e un terzo transistor (T2, T3) collegati in serie, in quali hanno lo stesso tipo di drogaggio del primo transistor (T1) e presentano guadagno molto maggiore di quello del primo transistor (T1),
- i mezzi di iniezione (SP) sono atti a iniettare una corrente tale da portare il primo transistor (T1) a operare in condizioni di saturazione spinta e il secondo e terzo transistor (T2, T3) a operare in condizioni di inversione debole, e
- il circuito di reazione comprende un amplificatore differenziale (AD) che riceve ai suoi ingressi la tensione presente ai capi di detti primo e secondo elemento (S1,

S2) e fornisce a detti mezzi di iniezione (SP) un segnale di controllo tale da mantenere il circuito in detto punto di lavoro.

2. Circuito secondo la riv. 1, caratterizzato dal fatto di comprendere inoltre una seconda unità (G2) di generazione di un riferimento in corrente, avente la stessa struttura della prima (G1) e comprendente un primo e secondo elemento con rispettive caratteristiche corrente-tensione tali che il punto di intersezione corrisponda a un valore di corrente (I_2) diverso da quello delle caratteristiche del primo e secondo elemento della prima unità, e dal fatto che dette due unità sono collegate a mezzi (CL) per la combinazione lineare delle rispettive correnti.

3. Generatore secondo la riv. 2, caratterizzato dal fatto che la prima e la seconda unità (G1, G2) sono atte a generare correnti che presentano un differente andamento con la temperatura.

4. Circuito secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 3, caratterizzato dal fatto che in entrambe le unità (G1, G2) detto primo transistor (T1) ha un guadagno che è l'inverso di quello del secondo e del terzo transistor (T2, T3)

5. Circuito secondo la riv. 4, caratterizzato dal fatto che il rapporto tra i guadagni del primo (T1) e del secondo o del terzo transistor (T2, T3) della prima unità (G1) è dell'ordine di 1:400.

6. Circuito secondo la riv. 4 o 5, caratterizzato dal fatto che il rapporto tra i guadagni del primo e del secondo o del terzo transistor è della seconda unità (G2) è dell'ordine di 1:100.

7. Circuito secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che la seconda unità (G2) è atta a generare una corrente la cui variazione, all'interno di un intervallo di temperatura prestabilito, è maggiore della variazione della corrente della prima unità (G1) all'interno dello stesso intervallo.

8. Circuito secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che i mezzi di combinazione lineare (CL) comprendono:

- un quarto e un quinto transistor (T21, T22), collegati rispettivamente al primo transistor (T1) della prima e della seconda unità (G1, G2) in modo da formare con questi un primo e un secondo specchio di corrente che moltiplicano per rispettivi fattori le correnti (I1, I2) fornite da detta prima e seconda unità,
- un sesto e un settimo transistor (T23, T24), che formano un terzo specchio di corrente (T23, T24) atto a invertire di segno la corrente uscente dal secondo specchio, il settimo transistor (T24) e il quinto transistor (T22) avendo un elettrodo in comune che costituisce un nodo di sottrazione (N2) delle correnti fornite da detto primo e terzo specchio,
- un sesto transistor (T25) che ha l'elettrodo di gate e quello di drain collegati a detto nodo di sottrazione (N2) e che costituisce il primo stadio di ulteriori specchi di corrente destinati ad applicare il riferimento generato dal circuito a dispositivi di utilizzazione.

p.p. CSELT - CENTRO STUDI E LABORATORI TELECOMUNICAZIONI S.p.A.



(dr. Franco CABELLA - Albo N. 69)



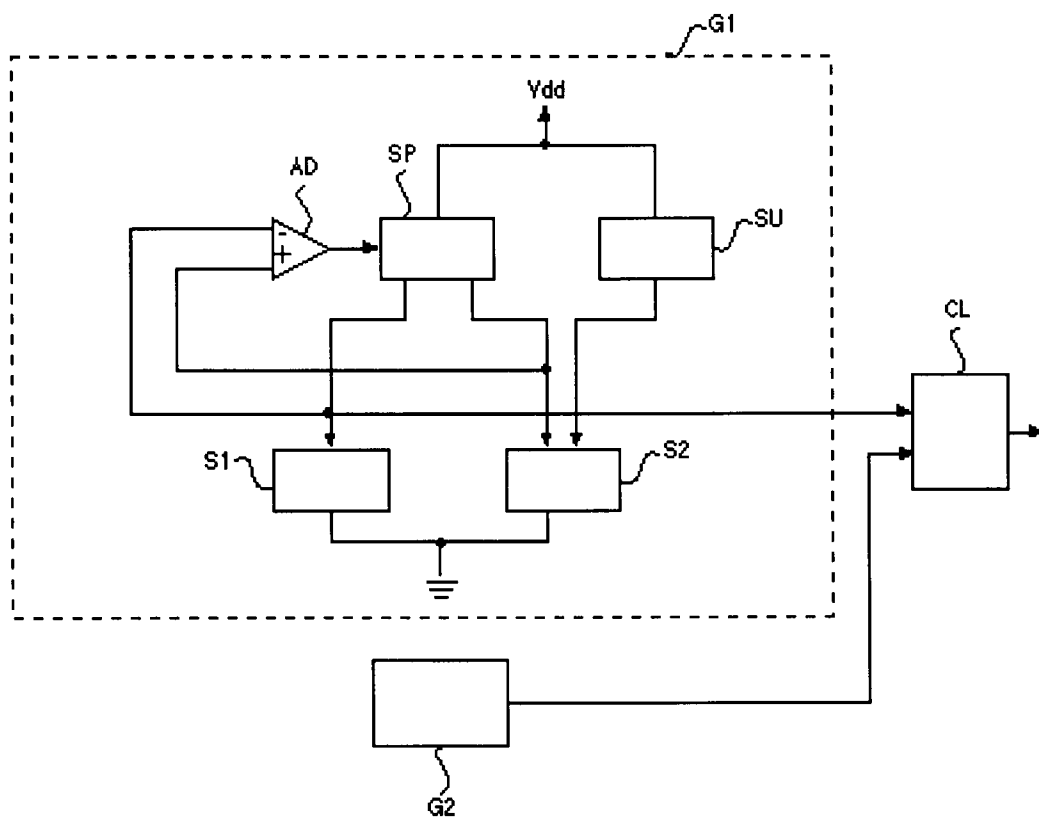


Fig. 1

p.p. CSELT-CENTRO STUDI E LABORATORI TELECOMUNICAZIONI S.p.A.

Franco Cabella

(Dr. Franco CABELLA - Albo N. 69)



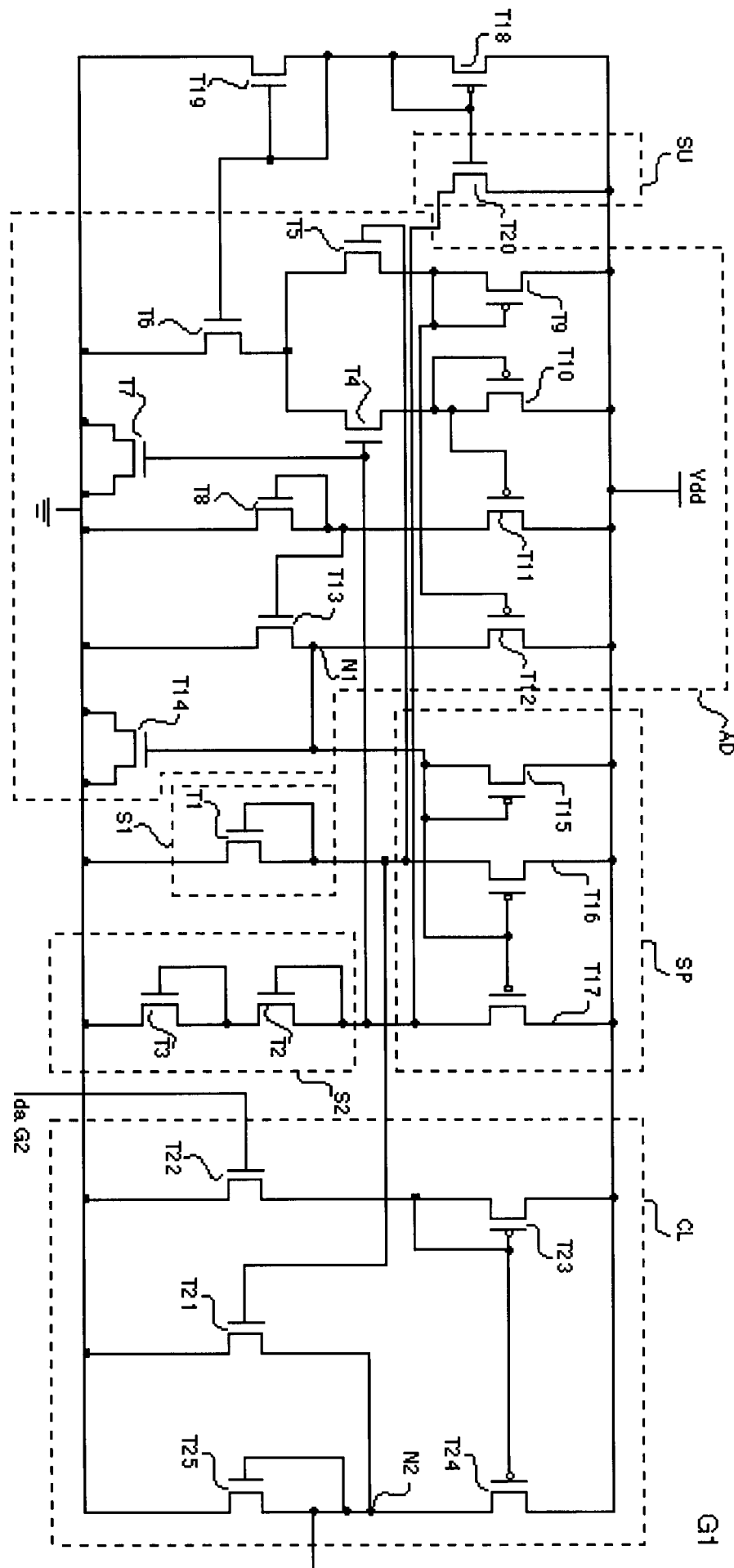


Fig. 2

p.p. CSELT - CENTRO STUDI E LABORATORI

TELECOMUNICAZIONI S.p.A.

Franco Cabella
(Dr. Franco CABELLA - ALBO N. 69)

[Handwritten signature]

TO 92-000831 $\times 10 \mu A$

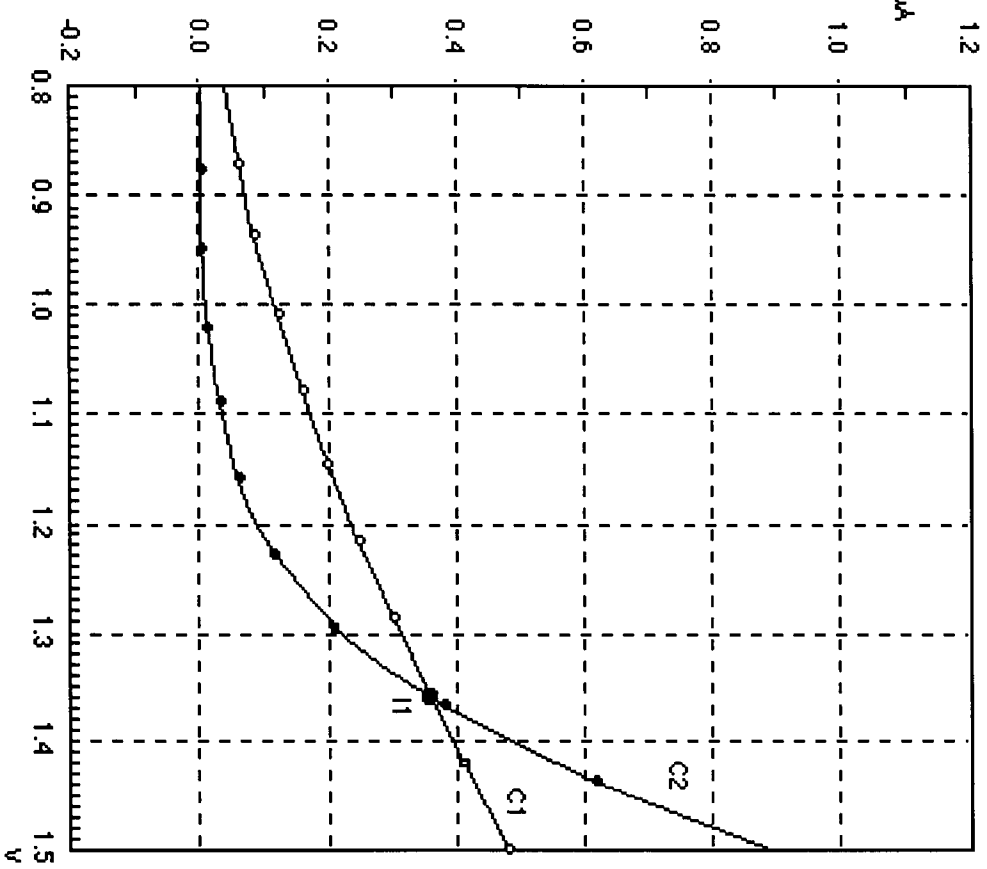


Fig. 3

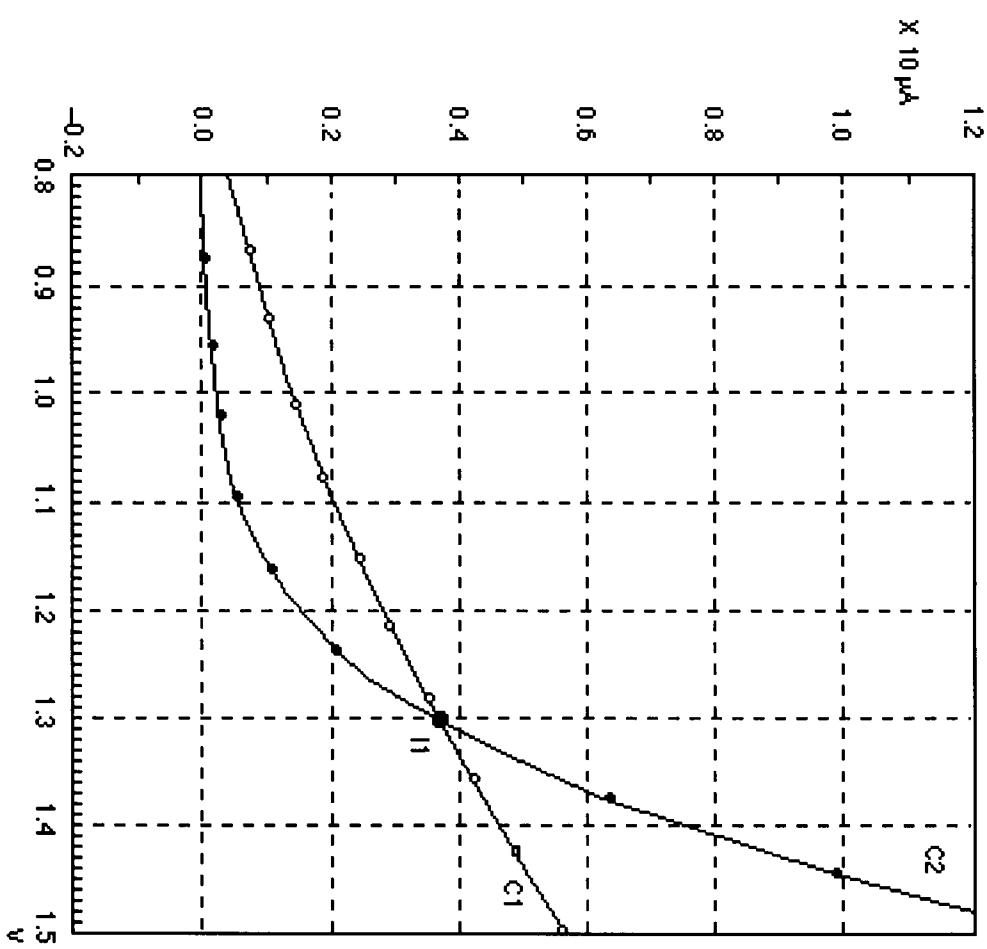
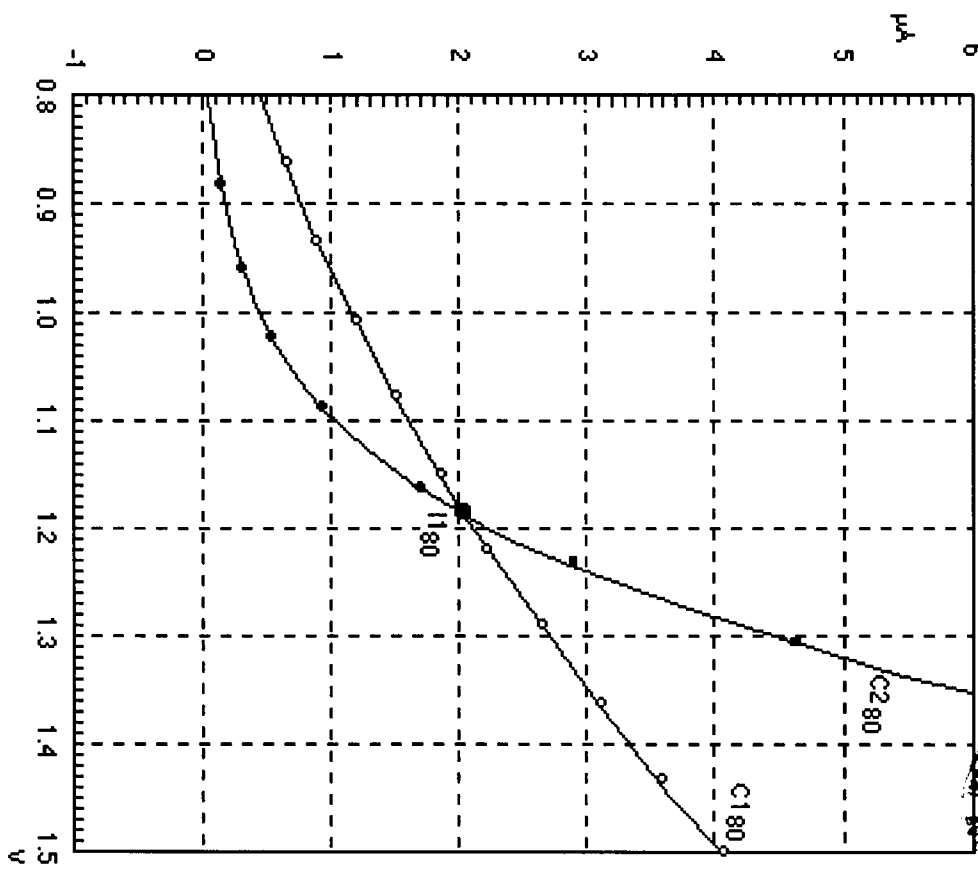
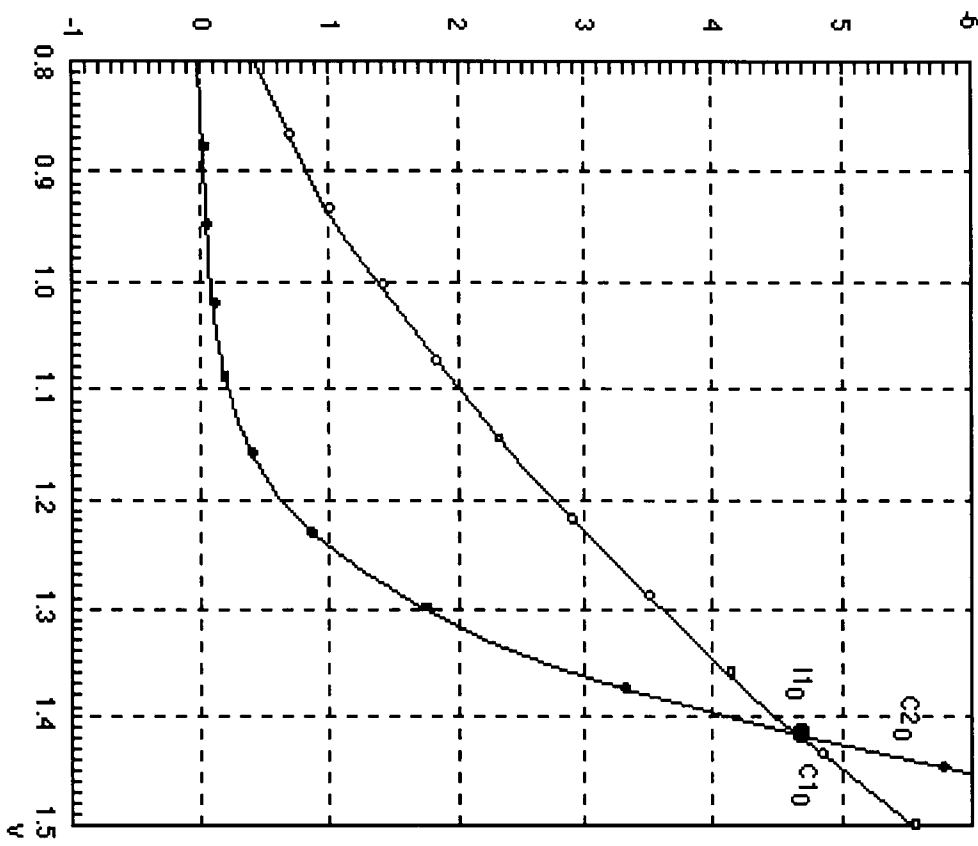


Fig. 4

p.p. CSELT - CENTRO STUDI E LABORATORI TELECOMUNICAZIONI S.p.A.
Franco Cabella
 (Dr. Franco CABELLA - Albo N. 69)



P. P. CSELT CENTRO STUDI E LABORATORI TELECOMUNICAZIONI S.p.A.

(Dr. Franco CABELLA - Albo N. 69)

TO 22 20:21

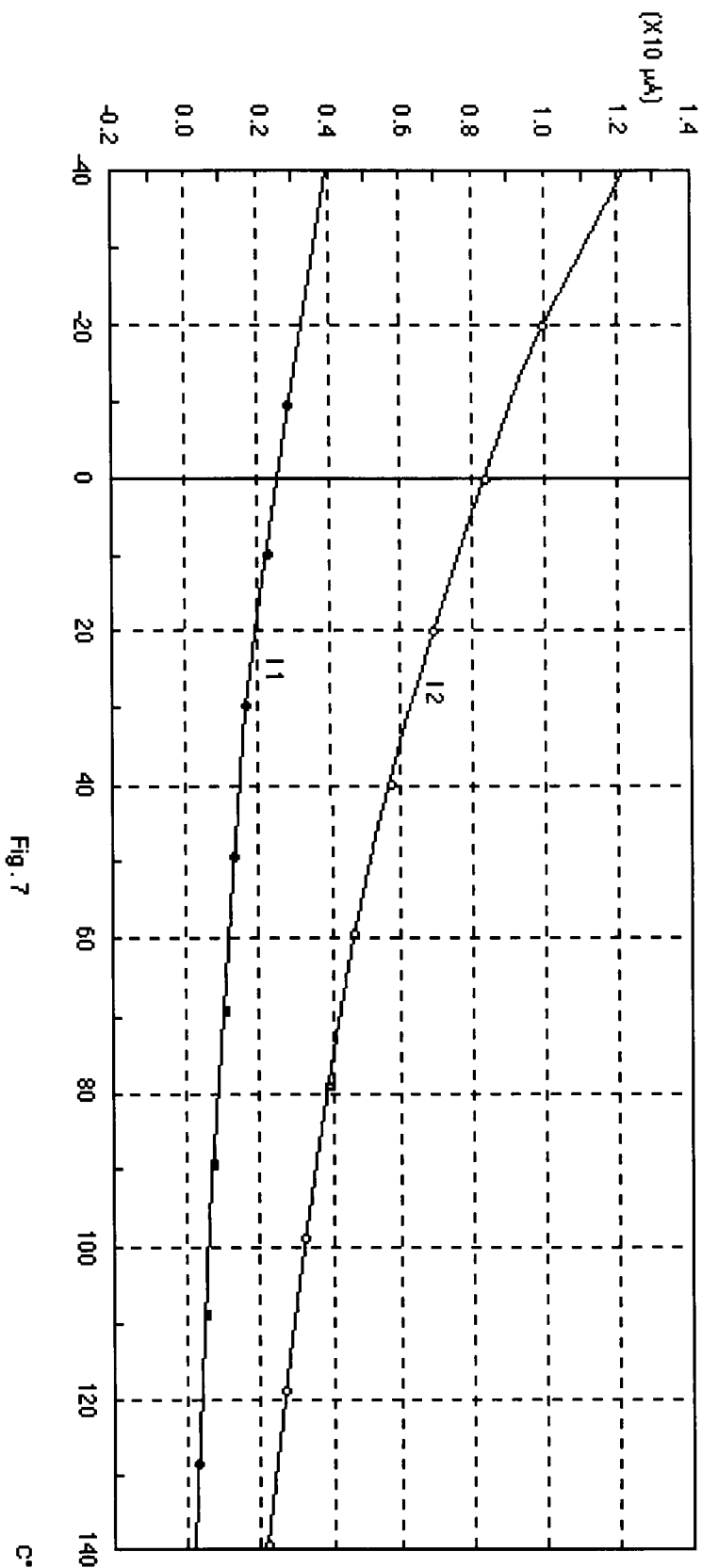


Fig. 7

P.P. CSELT - CENTRO STUDI E LABORATORI TELECOMUNICAZIONI S.p.A.

Franco Cabelia
(Dr. Franco CABELIA - Albo N. 69)



TO 08A 000031

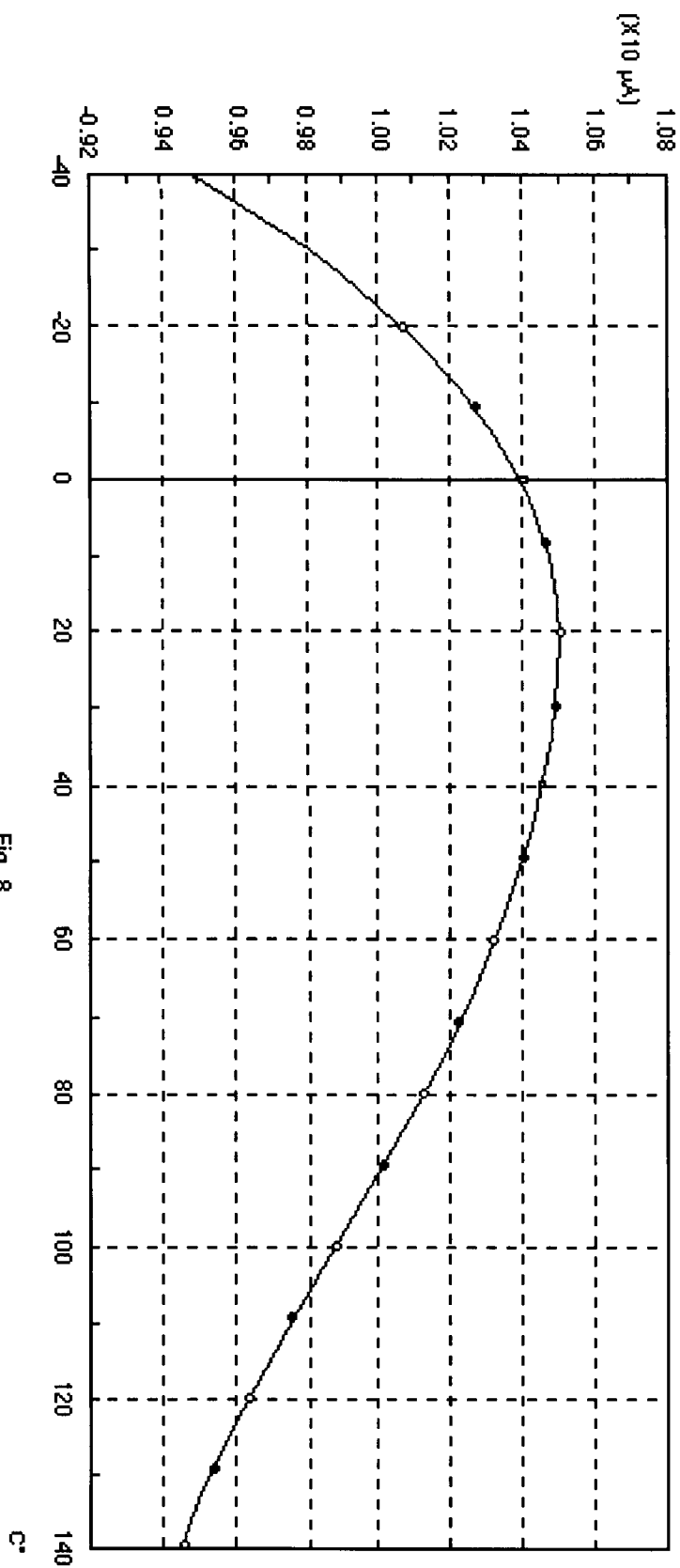


Fig. 8

P. P. CSELT - CENTRO STUDI E LABORATORI TELECOMUNICAZIONI S.p. A.

Franco Cabella
(Dr. Franco CABELLA - Albo N. 69)

