

Programas de computación para el estudio de celdas solares de silicio mediante mediciones de I-V

Andrés Martel Arbelo, Facultad de Física, Universidad de La Habana

RESUMEN

En este trabajo se presentan dos programas para microcomputadora capaces de:

- Extraer los parámetros eléctricos y de explotación de una celda solar de silicio a partir de la característica I-V iluminada.
- Predecir el comportamiento de la celda cuando los parámetros eléctricos de la misma varían.

Se describen y argumentan los algoritmos utilizados.

ABSTRACT

Two microcomputer programs are presented which are able to:

- Find the electric and exploitation parameters of a silicon solar cell from the illuminated I-V characteristics.
- Predict the silicon solar cell behaviour for variable electric parameters.

The algorithms used are described and discussed.

I. INTRODUCCIÓN

El uso del circuito equivalente con parámetros concentrados ha demostrado brindar un modelo eficiente para el análisis y modelación de las celdas solares de silicio que trabajan sin concentración. El empleo de microcomputadoras en la tarea de elaboración de las mediciones de I-V ofrece nuevas posibilidades de exactitud, rapidez y complejidad de los métodos utilizados. Los programas objeto de este trabajo combinan estos aspectos para lograr sus objetivos.

II. PARTE TEÓRICA

Como es conocido, la característica I-V iluminada de una celda solar de silicio en el modelo de parámetros concentrados y doble exponencial viene dada en su forma general por la ecuación (1):

$$I = I_L - (V + I R_s) / R_p - I r (EXP(q(V + I R_s) / N r k T) - 1) - I_d (EXP(q(V + I R_s) / N d k T) - 1) \quad (1)$$

Si tomamos $N_d=1$, entonces I_d es la corriente de difusión de Shockley [1] y para $N_r=2$, I_r será la corriente de recombinación [2], [3].

Varios métodos [4], [5], [6] han sido propuestos para calcular todos o algunos de los parámetros de la ecuación (1). El primero de nuestros programas, que nombraremos analizador, para lograr este fin combina algunas de las ideas de estos autores con nuestra experiencia en este campo. El segundo programa, que denominaremos sintetizador, resuelve la ecuación (1) para valores escogidos de los parámetros.

DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS

Programa analizador

Para $N_d=1$ y $N_r=2$ debemos determinar cinco parámetros: I_L , I_r , I_d , R_s , R_p . Para ello son necesarias cinco ecuaciones independientes. Tres de estas pueden ser [6]:

$$\left. \begin{aligned} R_p &= 1 / [1 / (R_{po} - R_s) - q / 2kT I_r EXP(q I_{cc} R_s / 2kT) - q / kT I_d EXP(q I_{cc} R_s / kT)] \\ R_s &= R_{so} - 1 / [1 / R_p + q kT I_r EXP(q V_{ca} / 2kT) + q kT I_d EXP(q V_{ca} / kT)] \\ I_L &= V_{ca} / R_p + I_r (EXP(q V_{ca} / 2kT) - 1) + I_d (EXP(q V_{ca} / kT) - 1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\text{Donde } R_{so} = -(dV/dI) \text{ para } I=0 \text{ y } R_{po} = -(dV/dI) \text{ para } V=0 \quad (3)$$

El programa analizador resuelve estas ecuaciones por métodos de iteración. En calidad de valores de partida hemos tomado:

$$\begin{aligned} R_p &= R_{po} \\ R_s &= R_{so} \\ I_L &= I_{cc} \end{aligned} \quad (4)$$

En el proceso de puesta a punto del programa resultó que la ecuación más ventajosa en el sentido de rapidez y exactitud fue la ecuación:

$$I_d = \{ [(R_p + R_s) I_{cc} - V_{ca}] / R_p - I_r [EXP(q V_{ca} / 2kT) - EXP(q I_{cc} R_s / 2kT)] \} / [EXP(q V_{ca} / kT) - EXP(q I_{cc} R_s / kT)] \quad (5)$$

Esto se debe a que el valor de partida para I_d se puede obtener más exacta y establemente a partir del punto de corto circuito y la aproximación de Shockley:

$$I_d = I_{cc}/\text{EXP}(qV_{ca}/kT)$$

(6)

Por estas razones, la ecuación (5) puede ser incluida en el sistema iterativo (2). En calidad de quinta ecuación resulta ventajoso calcular el cero con respecto a I_r de la ecuación

$$I(I_r, V_m) - I_m = 0$$

(7)

Esta ecuación resulta ventajosa debido a que en el punto óptimo las corrientes de difusión y recombinación suelen ser del mismo orden. Por ello la influencia de I_r es fuerte y su determinación más precisa.

De lo dicho se ve que la determinación de los parámetros de la celda se realiza a partir de los tres puntos más singulares de la característica I-V;

- corto circuito -
- circuito abierto -
- punto óptimo -

Algoritmo de cálculo

Los elementos principales del algoritmo de cálculo son:

- Entrada de valores y condiciones.
- Determinación del punto óptimo. Aquí mediante la inspección del producto IV se determinan I_m , V_m y P_m .
- Determinación de I_{cc} y R_{po} . Este proceso se realiza disminuyendo el voltaje a partir de V_m y escogiendo la recta que tiene el menor *error* relativo del intercepto (I_{cc}) y de la pendiente (R_{po}). En calidad de *error* se toma el intervalo de confianza correspondiente.
- Determinación de V_{ca} y R_{so} . Se efectúa de modo similar al anterior.
- Se realiza un número fijo de iteraciones y cada vez se resuelve la ecuación (7) y se determina Q que es el valor medio cuadrático de la distancia entre las características I-V teórica y experimental.
- Se escoge el conjunto de parámetros que corresponde al menor valor de Q .
- Se supone $R_s=0$ y $R_p=\infty$ y se calculan las corrientes y características de la juntura ideal.
- Se calculan las magnitudes de salida y se construyen los gráficos.

Con esta organización se logra que el programa corra para diferentes exactitudes de los datos experimentales. La calidad del ajuste se juzga por el valor de Q y dependerá de la exactitud mencionada. El programa brinda como salida la siguiente información:

- Gráficos de I-V experimental, teórico e ideal.
- Corriente de corto circuito.
- Voltaje de circuito abierto.
- Corriente, voltaje y potencia en el punto óptimo.
- Factor de llenado.

- Eficiencia.
- Densidad de fotocorriente.
- Densidad de corriente de difusión.
- Densidad de corriente de recombinación.
- Resistencia serie.
- Resistencia paralelo.

Programa sintetizador

Este programa construye familias de curvas de I_{cc} , V_{ca} , I_m , V_m , P_m y F_f tomando como variable independiente y parámetro a dos cualesquiera de las características del circuito equivalente a saber; I_l , I_r , I_d , N_r , N_d , R_s , R_p . Para ello se basa en la solución de la ecuación (1) con respecto a la corriente.

Algoritmo de cálculo

Los elementos principales del algoritmo son:

- Entrada de valores y condiciones.
- Determinación del conjunto de valores de la variable independiente y del parámetro para el cual se debe resolver la ecuación (1).
- Determinación de I_{cc} y V_{ca} .
- Solución de la ecuación (1) para el conjunto anteriormente señalado. Esta solución se realiza por el método de partición del intervalo. En cada caso se calcula I_m , V_m y P_m .
- Cálculo de las magnitudes de salida.
- Construcción de las tablas y gráficos de salida.

La salida se realiza en forma de tablas y/o gráficos en el monitor o ploteador.

III. RESULTADOS

Programa analizador

En la tabla y figura 1 se muestra un ejemplo de corrida para una celda de silicio monocristalino (IPO27TI) obtenida por técnicas de capa gruesa. Los puntos experimentales fueron medidos gráficamente a partir de una curva I-V obtenida en un registrador X-Y. En ambas se ve que el ajuste es bueno ($Q \approx 0.005$) y que la mayor divergencia la aportan los puntos cercanos al circuito abierto. Esto puede deberse a que en esta región la característica I-V es muy abrupta y la determinación del voltaje por el método gráfico se hace menos precisa. También existe la tendencia al empeoramiento del ajuste para bajas corrientes [7]. Los valores de Q obtenidos por el programa para diferentes celdas y mediciones oscilan entre 0.01 y 0.005 en dependencia, al parecer, de la exactitud de los datos.

Programa sintetizador

En la tabla 2 y las figuras 3, 4, 5, 6 y 7 se muestra la corrida para la celda mencionada en el caso en que I_l actúa variable independiente y R_s como parámetro. Para R_s se han escogido los valores 0.13 y 1 Ohm. El primer valor corresponde al calculado por el programa analizador. También los valores escogidos para el resto de los parámetros coinciden con los calculados por el programa analizador. Los niveles de I_l corresponden aproximadamente a 0.2-2 Soles para esta celda. Esta situación simula el comportamiento de las celdas con dos contactos diferentes (R_s) en condiciones de iluminación variable. En los gráficos se puede apreciar el comportamiento de la celda en estas condiciones.

Las ondulaciones que en todos los casos aparecen en los gráficos de I_m y V_m no obedecen a causas físicas sino que son producto de la inexactitud en la determinación de estas magnitudes.

IV. CONCLUSIONES

- El Programa analizador permite calcular las características eléctricas y de explotación de una celda solar a partir de las mediciones de I-V bajo iluminación.
- El programa sintetizador permite estudiar y simular el comportamiento de la celda para distintas situaciones de variación de los parámetros de la misma.

Símbolos utilizados

- Ff - Factor de llenado
- I - Corriente
- I_{cc} - Corriente de corto circuito
- I_d - Corriente de difusión
- I_l - Fotocorriente
- I_r - Corriente de recombinación
- k - Constante de Boltzman
- N_d - Factor de difusión
- N_r - Factor de recombinación
- P_m - Potencia óptima
- q - Carga de electrón
- R_p - Resistencia paralelo
- R_s - Resistencia serie
- T - Temperatura
- V - Voltaje
- V_{ca} - Voltaje de circuito abierto
- V_m - Voltaje óptimo

MEDICIONES DE I-V ILUMINADA EN CUARTO CUADRANTE

Celda IPO27TI

Parámetros reales calculados

Corriente de corto circuito	$I_{cc} = 0.545E+00 + - 0.819E-03 A$
Voltaje de circuito abierto	$V_{ca} = 0.586 + - 0.007 V$
Corriente óptima	$I_{op} = 0.505E+00 + - 1.38E-02 A$
Voltaje óptimo	$V_{op} = 0.475 + --0.013 V$
Potencia óptima	$P_{op} = 0.240E+00 + -0.234E-03 W$
Factor de llenado	$FF = 0.750 + - 0.011$
Eficiencia	$Ef = 12.0 + - 0.012 \%$
Densidad de fotocorriente	$J_1 = 2.73E-02 + -2.73E-05 A \text{ por cm cuadr.}$
Densidad de I de recombinación	$J_r = 1.03E-07 + -1.03E-10 A \text{ por cm cuadr.}$
Densidad de corriente de dif.	$J_d = 2.99E-12 + -2.99E-15 A \text{ por cm cuadr.}$
Resistencia serie	$R_s = 0.040 + -0.0000 Ohm$
Resistencia paralelo	$R_p = 1.93E+02 + -0.19E+00 Ohm$

Parámetros ideales calculados

Corriente de corto circuito	$I_{cc} = 0.545E +00 + - 0.819E-03 A$
Voltaje de circuito abierto	$V_{ca} = 0.589 + - 0.000 V$
Factor de llenado	$FF = 0.783 + - 0.003$
Corriente óptima	$I_{op} = 0.503E +00 + - 1.35E-02 A$
Voltaje óptimo	$V_{op} = 0.500 + - 0.013 V$
Potencia óptima	$P_{op} = 0.251E+00 + - 0.501E-03 W$
Eficiencia	$Ef = 12.6 + - 0.025 \%$

$Q = 6.85673E-03$

La mejor aproximación fue la N9.5
Fallo del 30. % de las aproximaciones

Valores suministrados para el cálculo

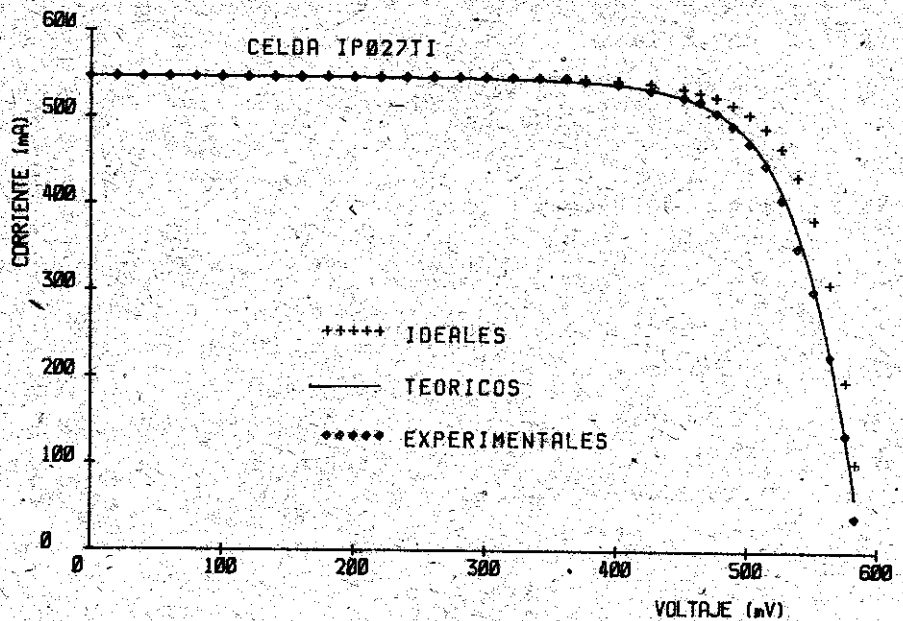
Area de dispositivo	$S = 20 \text{ cm cuadr.}$
Radiación incidente	$R = 100 \text{ mW/cm cuadr.}$
Temperatura del experimento	$T = 28 \text{ grados CELSIUS}$

88/04/06

14:03:09

TABLA 1. Programa analizador: información de salida.

Figura 1. Programa analizador: gráficos de salida



Parámetros utilizados

Corriente de recombinación $I_r = 1.00E-03$ mA
 Corriente de difusión $I_d = 1.00E-07$ mA
 Factor de recombinación $F_r = 2.00$
 Factor de difusión $F_d = 1.00$
 Resistencia paralelo $R_p = 4.00E+01$ Ohm

$R_s = .1 - 1$ Ohm
 $I_l = 100 - 1000$ mA

TABLA DE VALORES

I _l mA	I _{cc} mA	R _s = .1 Ohm				
		V _{ca} mV	I _m mA	V _m mV	P _m mW	F _f %
1.00E+02	100	524	83	424	35.3	67.5
1.50E+02	150	538	127	446	56.5	70.2
2.00E+02	200	547	175	444	78.0	71.5
2.50E+02	249	554	225	442	99.4	72.0
3.00E+02	299	559	270	447	120.7	72.1
3.50E+02	349	564	314	452	142.0	72.2
4.00E+02	399	568	357	456	162.8	71.9
4.50E+02	449	571	409	449	183.6	71.7
5.00E+02	499	574	451	452	204.0	71.3
5.50E+02	549	577	504	444	224.0	70.8
6.00E+02	599	579	548	445	243.9	70.4
6.50E+02	648	581	586	450	263.4	69.9
7.00E+02	698	583	643	440	282.6	69.4
7.50E+02	748	585	683	442	301.7	68.9
8.00E+02	798	587	729	439	320.2	68.3
8.50E+02	848	589	778	435	338.4	67.8
9.00E+02	898	590	820	435	356.4	67.2
9.50E+02	948	592	871	429	373.8	66.6
1.00E+03	998	593	908	431	391.0	66.1

TABLA DE VALORES

I _l mA	I _{cc} mA	R _s = 1 Ohm				
		V _{ca} mV	I _m mA	V _m mV	P _m mW	F _f %
1.00E+02	98	524	81	364	29.4	57.6
1.50E+02	146	538	119	356	42.5	54.0
2.00E+02	195	547	157	335	52.5	49.2
2.50E+02	244	554	192	312	60.0	44.4
3.00E+02	293	559	212	307	65.3	39.9
3.50E+02	341	564	229	302	69.1	36.0
4.00E+02	388	568	244	295	72.0	32.7
4.50E+02	433	571	258	288	74.2	30.0
5.00E+02	471	574	260	292	76.0	28.1
5.50E+02	499	577	263	295	77.5	26.9
6.00E+02	518	579	265	297	78.8	26.3
6.50E+02	530	581	277	289	79.9	25.9
7.00E+02	540	583	278	291	80.9	25.7
7.50E+02	547	585	280	293	81.8	25.5
8.00E+02	553	587	280	295	82.6	25.4
8.50E+02	558	589	282	295	83.4	25.4
9.00E+02	563	590	283	297	84.0	25.3
9.50E+02	566	592	287	295	84.7	25.2
1.00E+03	570	593	286	298	85.2	25.2

TABLA 2. Programa sintetizador: información de salida

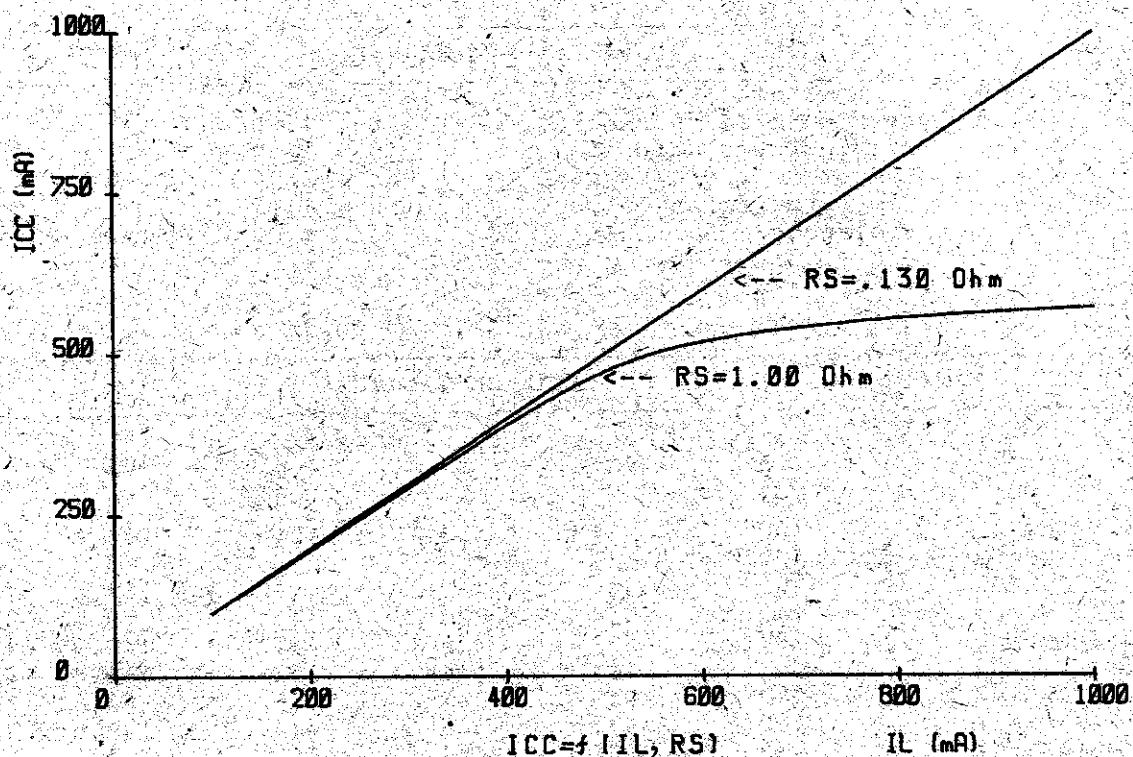


Figura 2. Programa sintetizador: variación de la corriente de cortocircuito con la iluminación para diferentes contactos

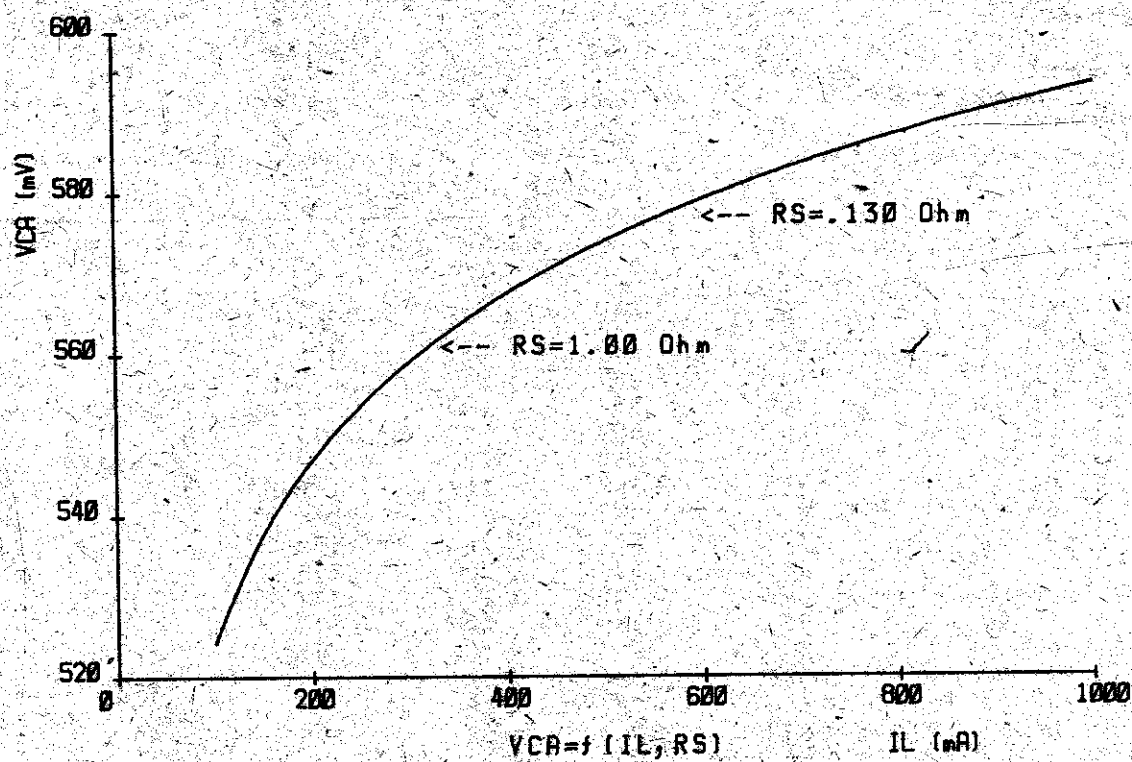


Figura 3. Programa sintetizador: variación del voltaje de circuito abierto con la iluminación para diferentes contactos

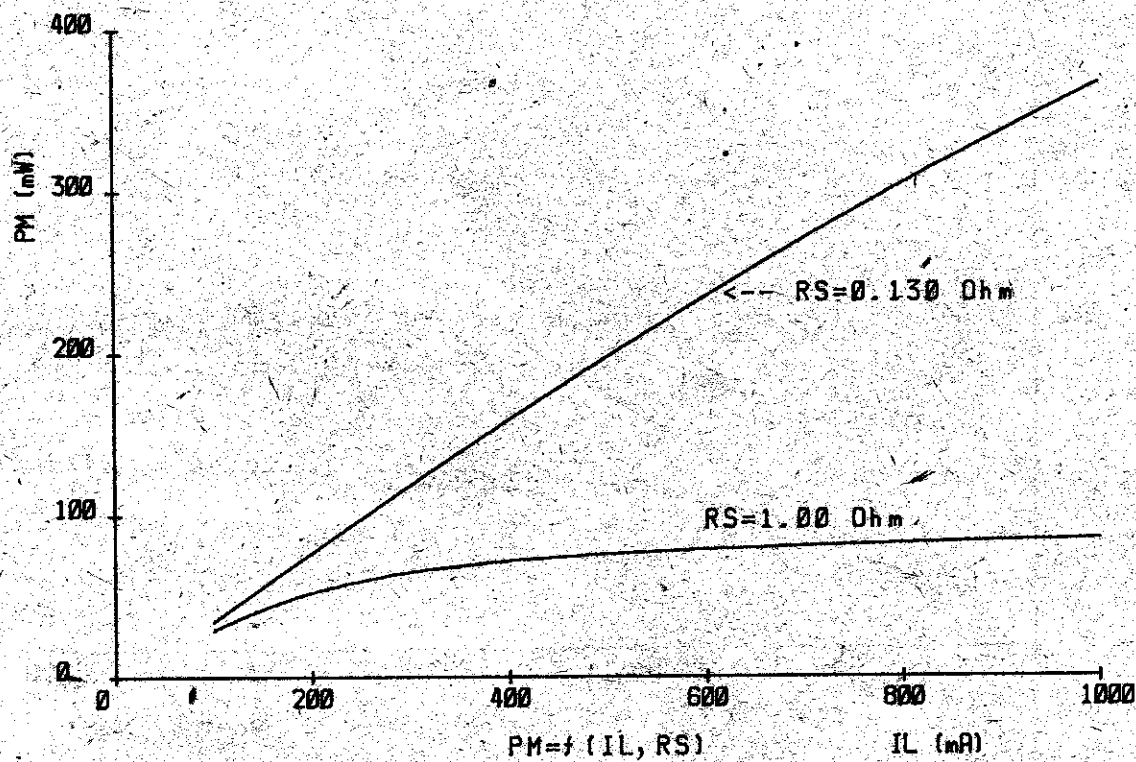


Figura 4. Programa sintetizador: variación de la potencia óptima con la iluminación para diferentes contactos

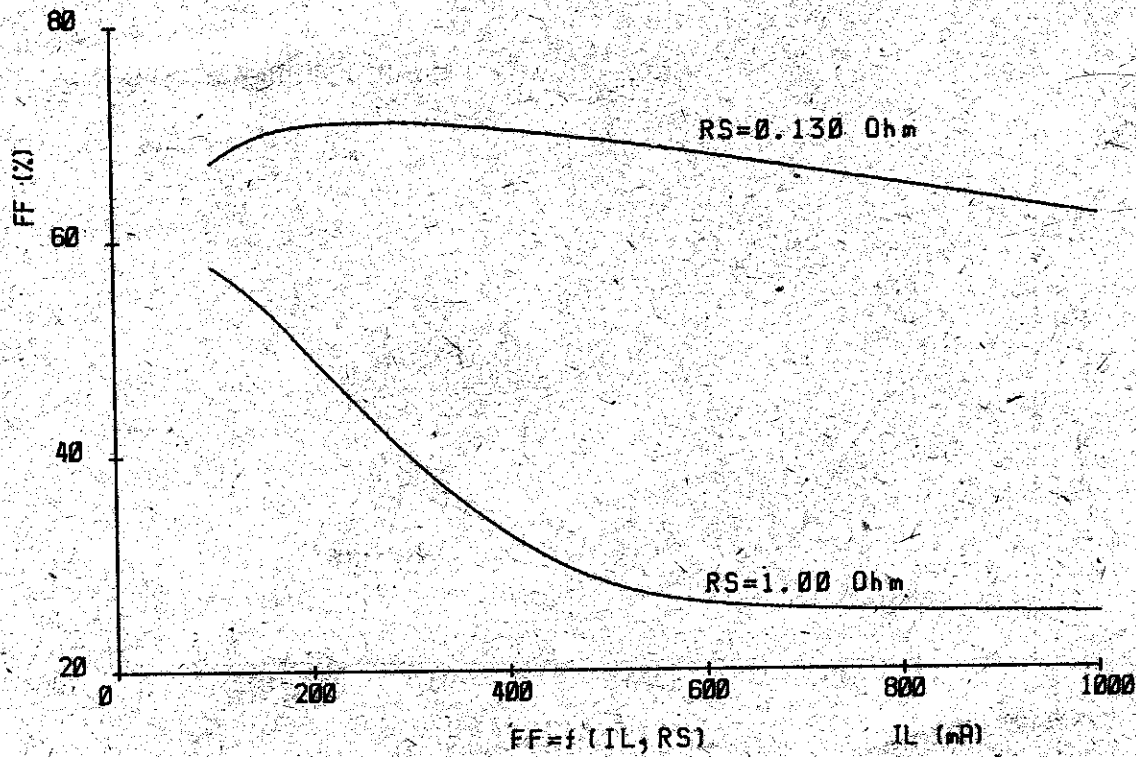


Figura 5. Programa sintetizador: variación del factor de llenado con la iluminación para diferentes contactos

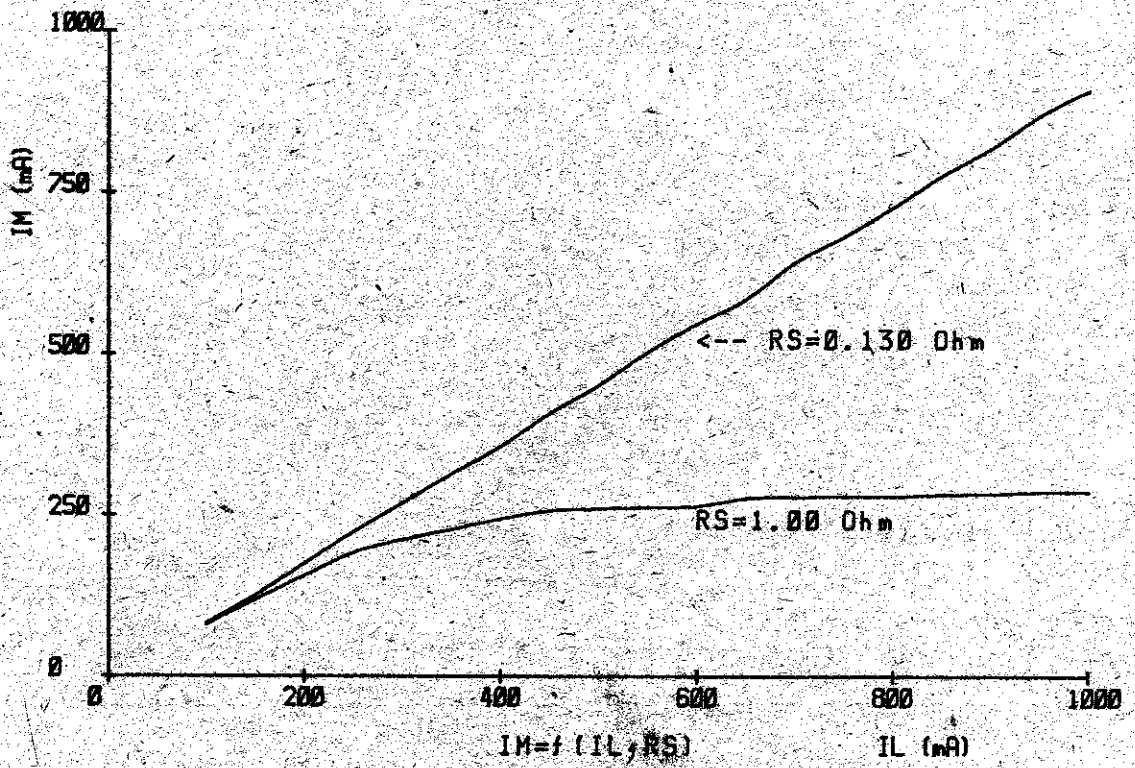


Figura 6. Programa sintetizador: variación de la corriente óptima con la iluminación para diferentes contactos

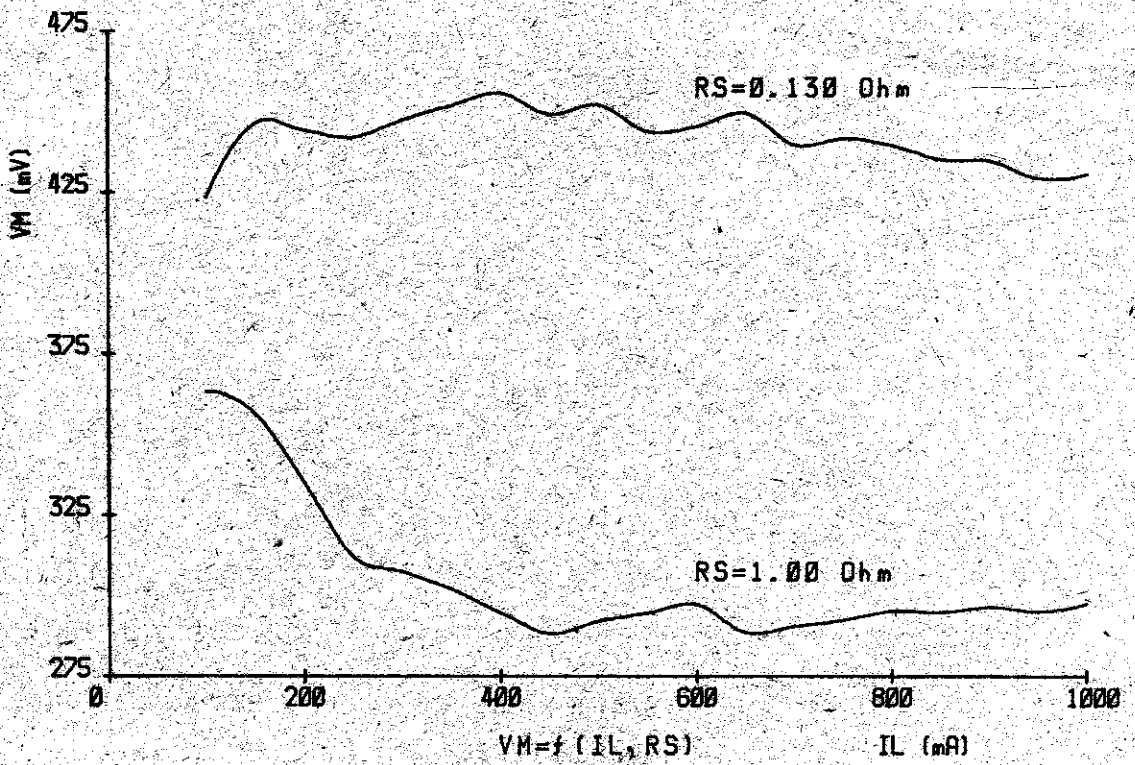


Figura 7. Programa sintetizador: variación del voltaje óptimo con la iluminación para diferentes contactos

BIBLIOGRAFIA

- [1] Shockley, W.
Bell Syst. Tech. J 23, pp 435-439 (1949).
- [2] Sah, C.; R.N. Noyce and W. Shockley
Proc. 45 pp, 1228-1243 (1957).
- [3] Henry, C.H.; R.A. Logan and P.R. Merritt
J. Appl. Phys., Vol. 49, pp. 3330-3342 (1978).
- [4] Martel, A.; S. Aguilera; N. Safronova and M. Garcia
Cryst. Res. Tech., Vol. 20, pp. 1261-1269 (1985).
- [5] Polman, A.; W.G. Van Sark, W. Sinke W. and F.W. Saris
Solar Cells, Vol. 17, pp. 241-2251 (1986).
- [6] Charles, J.P.; G. Bordure; A. Khoury and P. Mialhe
J. Phys D. Appl. Phys. 18, pp. 2261-2268 (1985).
- [7] Charles, J.P.; I. Mekkakoi and G. Bordure
Solid State Electronic, Vol. 28, No. 8, pp. 807-820 (1985).

Estructura interna e interacción de los solitones

Jorge A. González, Departamento de Física, Universidad de Camagüey

RESUMEN

Se obtiene el potencial de interacción solitón-antisolitón (Teoría ϕ^4). Se demuestra que la estructura interna del solitón se comporta como un resorte relativista elástico.

ABSTRACT

The soliton-antisoliton interaction potential is obtained (ϕ^4 theory). It is proved that the internal structure of the soliton behaves as a relativistic string.

1. Un buen resumen temático sobre la aplicación de los solitones en la teoría del campo se puede encontrar en los reportes de Makhankov [1,2].

En los trabajos del autor de la presente comunicación [3,5] se investigó la ecuación general no lineal,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - R' \frac{\partial \phi}{\partial t} + G(\phi) = 0 \quad (1)$$

demostrándose las condiciones necesarias para la existencia de ondas solitarias. Se estudiaron además, todos los tipos posibles de estas ondas.

Para el caso particular

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - R' \frac{\partial \phi}{\partial t} + \alpha \phi + \beta \phi^3 = h \quad (2)$$

que es la ecuación de la teoría del campo ϕ^4 forzada por un campo externo h y una fuerza disipativa, fueron obtenidas las soluciones exactas.

Como resultado de todos estos trabajos podemos decir lo siguiente:

Cuando $h = R' = 0$ la ecuación (2) tiene soluciones en forma de solitones y antisolitones libres moviéndose a velocidad constante V :

$$\phi = \pm \sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}} \operatorname{th} \left[\sqrt{\frac{\alpha}{2}} \frac{x-Vt-X_0}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} \right], \quad (3)$$

Aquí th representa la tangente hiperbólica, x_0 es una constante arbitraria que determina la posición inicial del solitón.

Si la fuerza externa h es *conectada* (supongamos para mayor definición $h > 0$) el solitón será acelerado hacia la *derecha* (en dirección positiva del eje X) mientras que el antisolitón recibirá una aceleración en sentido contrario.

El comportamiento es newtoniano (relativista) [6].

Si $h \neq 0$ la ecuación (2) también posee una solución correspondiente a un estado estacionario ($V=0$)

$$\phi = \frac{2\sqrt{2P} (P - 3y^2)}{(P-y^2)e^k + P e^{-k} + 2y\sqrt{2P}} + y \quad (4)$$

donde

$$P = -\frac{\alpha}{\beta}, \quad K = \sqrt{\beta(P - 3y^2)} \cdot (X - X_0)$$

La magnitud y es una de las raíces $y_3 < y_1 < y_2$ de la ecuación cúbica $\alpha\phi + \beta\phi^3 = h$ en dependencia del signo de h . Si $h > 0$, $y=y_2$, si $h < 0$, $y=y_3$.

En lo adelante supondremos $h > 0$ ($h^2 < -\frac{4}{27} \frac{\alpha^3}{\beta}$).

La función (4) tiene la siguiente propiedad

$$\phi \rightarrow y_2, \quad x \rightarrow \pm \infty$$

Es decir, tiende al mismo valor en $+\infty$ y en $-\infty$ y posee un mínimo

$$\phi_{\min} = \sqrt{2(P - y_2^2)} - y_2$$

2. Un estudio detallado de la función (4) nos permite ver que es semejante a un estado ligado de un solitón y un antisolitón que se encuentran a cierta distancia uno del otro (ver [3-5]).

Comúnmente se define el punto de inflexión de la función $\phi(x)$ como el centro de masa del solitón, por lo que la distancia entre el solitón y el antisolitón estará dada por la separación geométrica de los dos puntos de inflexión de la función (4).

Esta distancia R se puede calcular como

$$R = \frac{2 \operatorname{arc} \operatorname{ch} \left(\frac{M}{Y_1 - Y_2} - N \right)}{\sqrt{\beta(P - 3Y_2^2)}} \quad (5)$$

donde

$$M = \frac{2\sqrt{2P} (P - 3Y_2^2)}{\sqrt{P(P - Y_2^2)}}, \quad N = \frac{2\sqrt{2P} Y_2}{P - Y_2^2} \quad (6)$$

Con el aumento de h disminuye la distancia entre el solitón y el anti-solitón y se hace más evidente su deformación (ver [3-5]).

La causa de la deformación es la interacción entre ellos.

Esta interacción tiene carácter de atracción.

Este estado estacionario de un solitón y un antisolitón puede existir debido a que, aparte de la fuerza de atracción entre ellos, está presente la fuerza externa h que sobre el solitón actúa hacia la derecha y sobre el antisolitón en sentido contrario.

La distancia R de la expresión (12) es la crítica para que se equilibren la fuerza de atracción de los solitones y la fuerza externa que los separa.

El sentido común nos dice que este estado de equilibrio es inestable y efectivamente: la inestabilidad de la solución (4) ha sido establecida por el autor [3-5].

Sin embargo, su existencia nos permite calcular la dependencia de la fuerza de atracción (que en el equilibrio coincide con h) respecto a la distancia que separa a los solitones.

La fórmula (5) nos da esta dependencia aunque de forma no explícita.

Un estudio de (5) nos ofrece la siguiente información: la fuerza de atracción h(R) posee un máximo en el origen

$$h(0) = \alpha \sqrt{-\frac{4\alpha}{27\beta}} \quad (7)$$

y decrece exponencial con la distancia

$$h(R) \sim e^{-\sqrt{\alpha} R} \quad (8)$$

3. Ahora utilizaremos a (4) para investigar la estructura interna del solitón.

Definamos primeramente el tamaño del solitón para poder hablar de estructura interna.

La función (3) tiende exponencialmente en $+\infty$ y en $-\infty$ a los valores del vacío ($\pm \sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}$) en los cuales la energía es cero.

Estos valores se alcanzan más rápidamente entre mayor sea el valor de $\sqrt{2\alpha}$ (este es el coeficiente delante de la X en el exponente). Por eso usualmente se define como radio del solitón el valor

$$R_s = \frac{1}{\sqrt{2\alpha}} \quad (9)$$

El solitón y el antisolitón que están involucrados en el estado ligado (4), sufren una deformación debido al par de fuerzas que actúan sobre ellos en sentidos contrarios.

El nuevo radio del solitón deformado será

$$R_{s \text{ def}} = \frac{1}{\sqrt{\beta(P-3y_2^2)}} \quad (10)$$

Para una fuerza externa h pequeña ($h \ll \alpha \sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}$) tenemos

$$R_{s \text{ def}} \approx \frac{1}{\sqrt{2\alpha}} \left[1 + \frac{3h}{4\alpha \sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}} \right] \quad (11)$$

Lo que quiere decir que la deformación respecto al estado inicial de un solitón no perturbado (3) es

$$\Delta R = \frac{3}{4} \sqrt{-\frac{\beta}{2}} \frac{h}{\alpha^2} \quad (12)$$

¡La estructura interna del solitón resulta ser elástica!

(La deformación es proporcional a la fuerza externa).

Esto conlleva a que la estructura interna del solitón se comporte dinámicamente como un resorte relativista.

Los experimentos numéricos y análisis perturbativos realizados por Makhankov [1,2] para estudiar la estabilidad del solitón (3) confirman la existencia de oscilaciones del radio del solitón como reacción a pequeñas perturbaciones.

La fórmula exacta (10) nos permite conocer la deformación del radio del solitón para campos externos muy intensos.

Puede considerarse que este resorte es el que mantiene unidos a los quarks que forman el solitón.

BIBLIOGRAFIA

1. Makhan'kov, V.G.
Phys. Rep. 35, pag. 1 (1978).
2. Makhan'kov, V.G.
Fizika elementarnykh chástits i atomnogo yadra-Dubna. Vol. 14, No. 1,
pag. 1 (1983).
3. González, J.A.
ICTP, Trieste, Int. Report. IC/86/79 (1986).
4. González, J.A. y J.A. Holyst
ICTP, Trieste, Int. Report IC/86/122 (1986).
5. González, J.A. y J.A. Holyst
Physical Review B Vol. 35 No. 7, pag. 3643 (1987).
6. Dash, P.C.
Phys. Lett. 109 A, pag. 307 (1985).