

DESARROLLO DE PROTOTIPOS PARA GENERACIÓN LIMPIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y ESTUDIO DE MATERIALES

Acosta Estrada Marcelo, M.Sc.
Escuela Politécnica Nacional

Resumen

Como parte de la ejecución del proyecto, se ha construido un prototipo de prueba, para estudio de la captación de energía solar. El prototipo tiene una superficie igual a la de los paneles comerciales y tiene una potencia de 0.27 vatios con un arreglo de 10 celdas en serie y 15 en paralelo. Cada celda mide 66 cm². El arreglo puede rendir 156 vatios de potencia en 24 horas.

Introducción

La captación de la energía proveniente del sol tiene mucha actualidad debido a la elevación de los precios de los combustibles originados en hidrocarburos. Los esfuerzos tecnológicos realizados en los últimos años, por los países desarrollados, en sistemas de generación de energía eléctrica limpia, han dado como resultado paneles solares de alta eficiencia. Los éxitos comerciales que se deben, especialmente, a nuevas técnicas razonablemente baratas, tanto en la fabricación de paneles en base a silicio amorfo, cristalino y policristalino, como a mejores técnicas para construir películas de compuestos especialmente de los grupos III, IV y V. Los compuestos de mayor uso en celdas solares son al momento Ga, In, Cu y Se. Los paneles solares comerciales están compuestos de celdas solares individuales que miden ordinariamente algunos centímetros y son gigantescos en comparación con dispositivos tales como los circuitos integrados. Es decir, comparativamente, las celdas de los paneles solares son más fáciles de construir (recubrimiento y grabado; cuartos limpios, reactores de deposición, en fase vapor), pero son más complicadas desde el punto de vista de lograr grandes áreas de capas de semiconductor, necesarias para células solares de gran eficiencia. De todas maneras, actualmente, un panel solar comercial promedio, con esta tecnología, de una superficie de aproximadamente 80 x 120 cm, es de un precio promedio de mercado de US

\$ 700 y genera en promedio 17 voltios y 7 amperios durante las horas de irradiación solar.

Antecedentes

Dirk M. Guldi del Laboratorio de Radiación de la Universidad de Notre Dame reportó que los nanotubos de carbón de una sola pared pueden ser acondicionados para la construcción de un gran número de componentes electrónicos. Guild, Paoluci y Parto de la universidad de Trieste fijaron ferroceno a las paredes de nanotubos de esas características. El ferroceno tiene un átomo de hierro que se encuentra "emparedado" entre dos compuestos cíclicos de cinco carbonos. Si los nanotubos de carbono se irradian con luz visible, sirven como aceptores para los electrones emitidos desde el ferroceno. (Tomado y traducido de Chem. Eng. Progress, Nov 2003, pag 17).

Por otra parte la mayoría de los nanosensores están basados en nanopartículas con un rango de tamaño que va desde el rango meso (10-100 nm) hasta el macro (más de 100nm) y son compuestos de silicio, especialmente los biosensores ópticos. Se han empleado en detección de iones metálicos en fluidos y en gases. La detección se realiza mediante medidas de fluorescencia.

La obtención de partículas de ese tamaño es un empeño actual de laboratorios en universidades, empresas estatales y privadas. Existen al momento algunas tecnologías conocidas. La mayoría de esas no han alcanzado aún nivel comercial. Algunas de las técnicas emplean elevadas temperaturas como las técnicas de plasma y otras temperaturas razonables como la de aerogeles. Siempre han existido nanopartículas naturales como las zeolitas y el carbón activado.

Una vez obtenida la nanopartícula (en esta investigación nanopartículas naturales), para fabricación de dispositivos electrónicos u ópticos, la siguiente tarea es acondicionar a la nanopartícula. Para esto, inicialmente conviene localizar en la pared del nanotubo el metal

conveniente para la aplicación y en segundo término activarlo. Existen técnicas sumamente variadas para depositar en sitios apropiados metales o compuestos apropiados. La mayoría de las técnicas están aún en desarrollo.

Las nanopartículas, debido a su elevada superficie, tienen gran capacidad de retención de calor.

Fundamentos teóricos

Una fracción de la irradiación solar, en forma de energía radiante y térmica es absorbida en la superficie de las celdas solares investigadas en este trabajo (Tipo A, B o C), que puede describirse, según la ley de conservación de la energía.

Durante la descarga del dispositivo, según la segunda ley de Kirchhoff la caída de potencial a través de una resistencia (iR) es igual a la diferencia de potencial a través de la celda (Q/C). La carga, la intensidad y el voltaje pueden expresarse por las siguientes ecuaciones:

- (1) $q = q^0 \exp(-t/(RC))$
- (2) $i = (q^0/RC) \exp(-t/(RC)) = i_0 \exp(-t/(RC))$
- (3) $V = i_0 R \exp(-t/(RC))$

Donde:

- q = carga al tiempo t , (C)
- q^0 = carga inicial, en la celda, (C)
- i = intensidad de corriente, (A)
- i_0 = intensidad inicial de corriente, (A)
- t = tiempo, (s)
- C = capacitancia de la celda, (μF)

Que permiten establecer parámetros de referencia útiles, porque hacen factible comparaciones

A continuación se va a intentar una explicación de lo que sucede internamente dentro del material sólido que constituye la celda solar y para ello consideremos una capa muy delgada inmediatamente debajo del vidrio protector de la celda, esto es una tira o banda de material sólido constituida esencialmente de un semiconductor tipo n iluminada, por un lado, por la luz solar. Antes de la irradiación existe en equilibrio una concentración de electrones que excede (ordinariamente) al número de huecos (la cantidad depende del dopaje). Los electrones son el portador mayoritario.

Durante la irradiación se generan en la superficie, pares de electrones y huecos (la energía del fotón es mayor que la energía de banda y se tiene un coeficiente de absorción de la radiación elevado). Después de la irradiación se producen pares de portadores que se trasladan al interior de la tira por difusión (la difusión de un electrón es generalmente alrededor de tres veces la de un hueco, en el caso del Si) y se establece un campo eléctrico pequeño, debido al desbalance en número de portadores.

Si se parte de la consideración de que no existe, en la tira de sólido, corriente neta (flujo de electrones = flujo de huecos) y que las concentraciones de portadores son cercanamente idénticas en un sitio especificado (aproximación de electro-neutralidad), puede demostrarse que el transporte del portador minoritario es casi exclusivamente por difusión dado que se cumpla la siguiente condición:

$$(4) \quad |(\mu_p/\mu_n - 1)(C_{pn}/C_n)| < < 1$$

Donde:

- μ_i = movilidad de las especies i , (cm^2 . #electrones/(C. V.s))
- i = especies; electrones, huecos

C_{pn} = Concentración de portador minoritario (# electrones / cm^3)

C_n = Concentración de portador mayoritario (# electrones/ cm^3)

Esta condición se satisface si el número de portadores minoritarios no es muy grande en comparación con el número de portadores mayoritarios ($C_{pn} < C_n$). La misma conclusión no se puede alcanzar para el portador mayoritario dado que de estos últimos, existe una cantidad elevada, que es suficiente para responder al campo eléctrico.

Según los portadores se difunden dentro de la tira, ambos intentan retornar a sus concentraciones de equilibrio a través de reacción homogénea (recombinación). La concentración de portador minoritario está descrita por la siguiente ecuación de balance de materiales de los huecos (ecuación de la continuidad):

$$(5) \quad \frac{\partial C_{pn}}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + R_p$$

Con el flujo de carga descrito como:

$$(6) \quad J_p = q\mu_n C_{pn} \xi + qD_{pn} \frac{\partial C_{pn}}{\partial x}$$

Donde;

q = magnitud de la carga eléctrica
(C./#electr.); 1 coulomb = 6.28x10¹⁸
electrones

t = tiempo (s)

J_p = flujo de cargas positivas (densidad de corriente) C./(cm².s)

μ_n = movilidad de las especies i (cm².
#electr.)/(C.V.s)

ξ = campo eléctrico. (V./cm)

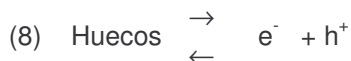
D_{pn} = Coeficiente de difusión de las especies positivas, (cm²/s)

R_p = velocidad de recombinación
(#electrones/(cm²)(s))

En estado estacionario, la concentración del portador minoritario puede estimarse de las ecuaciones (5) y (6) con las siguientes condiciones de frontera: a una distancia grande (x = ∞) la concentración de huecos en equilibrio, C_{pn}⁰, y en la superficie donde ocurre la irradiación C_{pn} = C_{pn}, como se escribe a continuación:

$$(7) \quad D_{pn} \frac{\partial^2 C_{pn}}{\partial x^2} + R_p = 0$$

El valor de R_p se estima de la consideración de recombinación directa con la ecuación



La velocidad de producción de h⁺ mediante esta reacción reversible es:

$$(9) \quad R_p = k_1 - k_{-1} C_n C_{pn} ; \text{ con constante de equilibrio } K_1 = k_1/k_{-1} = C_n^0 C_{pn}^0$$

k₁ = constante de velocidad de recombinación hacia delante, #electrones/(cm²)(s))

k₋₁ = constante de velocidad de recombinación en reversa, (cm⁴/(# electrones)(s))

La constante hacia adelante es de pseudoprimer orden debido a que la concentración de electrones es mucho mayor que la de huecos. La solución de la ecuación (7) permite encontrar la cantidad 1/k₋₁C_{pn}⁰, que es denominado el tiempo de vida media del portador minoritario, y también:

$$(10) \quad (C_{pn}(x) - C_{pn}^0) / (C_{pn}(x=0) - C_{pn}^0) = \exp(-x / (D_p \cdot t_p)^{1/2})$$

Se denomina al término (D_p · t_p)^{1/2} la longitud de difusión, que es importante porque permite relacionar el flujo de corriente del portador minoritario con la difusión a través de un espesor del material sólido con el cual se ha construido la celda.

A la distancia de una longitud de difusión, en algún instante puede distinguirse tres fuentes de portadores:

1. Generada por la recombinación (reacción química). La velocidad de producción de electrones se iguala a la velocidad de producción de huecos. Lejos del equilibrio, la concentración de portadores será muy pequeña. La carga total que atraviesa el plano es igual a la velocidad de generación de huecos. Si la región es de espesor W el flujo es:

$$(11) \quad J_p = q k_1 C_n^2 W.$$

donde:

W = espesor de la celda,(cm)

C_n = concentración del portador mayoritario, (# electrones/cm²)

2. Producida por la difusión de portadores minoritarios al plano que existe entre los portadores disponibles y aquellos excitados, y expulsados por el campo eléctrico de la zona activada por la luz solar, y dada por:

$$(12) \quad J_p = q C_{pn}^0 (D_p \cdot t_p)^{1/2}$$

3. Las dos corrientes anteriores tienen el mismo signo y en el equilibrio son contrabalanceadas por los portadores mayoritarios desde la región no excitada (región neutra) y capaces de igualar el potencial eléctrico generado.

En general se incrementa la movilidad de los electrones debido al incremento de temperatura, T, permitiendo a los electrones de la zona no excitada empatar con mayor facilidad el potencial generado en la zona excitada (proporcional a exp (q V/kT), (k= constante de proporcionalidad, V = voltaje). También la temperatura tiene incidencia en la reacción química, por lo cual su valor depende cuantitativamente del volumen del material

sólido de la celda. Puede concluirse que en general la corriente factible en la celda es proporcional a la concentración de portador disponible, lo que en definitiva depende del dopaje.

Materiales e instrumentos de medición

1. El material básico de construcción de los paneles solares de esta investigación es una lutita negra. Este material provino del páramo de Papallacta. Es una meso nanopartícula con tamaño de alrededor de 75nm. El análisis químico identifica la presencia de carbono, alúmina, silicio y hierro.
2. La ilmenita que es conocida como arena titanífera de Manta, que contiene acero y trazas de titanio.
3. Piedra pómez tratada con agua oxigenada y recuperada del flotado rico en óxidos diversos.
4. Cangahua, material característico de la zona andina y utilizada por su capacidad de retención de una cantidad fija de agua y por el tamaño muy pequeño de partícula.
5. Fluido iónico orgánico.
6. Glucosa, grado técnico, en polvo.
7. Alambre galvanizado de 0.9 mm de espesor.
8. Lámina de cobre de 0.03 de espesor.
9. Lamina de tol galvanizada de 0.05 mm de espesor.
10. Vidrio transparente de 4 mm de espesor.
11. Silicona, en crema para empaque.
12. Multímetro (Fluke 175), resistencia (10Ω), fuente de poder Omega (0-28 V, 2.5 A), Termocupla tipo K e instrumento de medición de temperatura

Preparación de material sólido de la celda

La preparación de material utilizado para captar la energía solar sigue los siguientes pasos:

1. Purificación de la lutita mediante tamizado a través de tamiz (ASTM 100), para retirar partículas de mayor tamaño y material orgánico.
2. Acondicionamiento del material. Consiste en ubicar anillos orgánicos alrededor del hierro en el interior de cada partícula. Se agrega el fluido iónico y se verifica el pH que es ligeramente ácido. Se agrega el catalizador que es la ilmenita y luego de agitación constante se deja reposar alrededor de dos horas. Si está

excesivamente ácido se debe agregar piedra pómez en una cantidad no mayor al 10% en peso de la mezcla.

3. Preparación de la celda de prueba. La celda de prueba fue fabricada con electrodos de cobre y tol en unos casos (celda tipo A) y con electrodos de alambre de cobre y de alambre galvanizado (celda tipo B). En el de material galvanizado el material activo es el Zinc.
4. Recubrimiento de la celda. La celda fue inundada hasta una profundidad aproximada de 3 mm de espesor con una solución con porcentajes diversos de materiales. Para efectuar el secado se sometió a la celda al calor de un lámpara infrarroja por alrededor de 15 minutos. El color de la celda resultante fue negro mate.

Celdas de Prueba

Celda tipo A. Está construida como un paralelepípedo de 0.13 cm de espesor, 5.5 cm de ancho y 12 cm de largo. La cara superior e inferior son de vidrio transparente de 4 mm. Las paredes laterales, que son un marco para contener el material y los electrodos, fueron construidas con silicona y se encuentran entre las caras superior e inferior del paralelepípedo. En el interior de esta caja se encuentran 13.3 cm² de lámina de cobre y 13.3 cm² de lámina de tol. Cada una en forma de peinilla, ubicadas de tal manera que no se toquen los dientes entre sí. La proporción de electrodos a la superficie total es de aproximadamente el 40%. La celda Tipo A fue ensayada con una proporción de 60% de lutita, 20% de ilmenita, 5% de cangahua, 5% de piedra pómez 10% de glucosa. Se realizaron mediciones de amperaje y voltaje durante seis meses, todos los días a diferentes horas. Se pudo establecer que la celda alcanzaba en promedio 1.2 mA y 0.46 volt a una temperatura promedio de 25° C, a exposición solar. En la noche, a las 19 horas alcanza 0.7 mA y 0.40 V, cuando la temperatura del cuarto es de 13 °C.

Celda tipo B. La celda tipo B, en sus dimensiones y proporciones es idéntica a la celda tipo A y contenido de electrodos. Se varió en este tipo de celda la proporción y contenido de materiales activos. La proporción de materiales en esta celda fue: 10% de glucosa 5% de piedra pómez 5% de cangahua 40% de lutita y 40% de ilmenita. Los resultados fueron interesantes porque mejoraron respecto de

esos obtenidos con la celda tipo A. La celda, expuesta a la irradiación solar alcanzaba en promedio 2.8 mA y 0.53 V a una temperatura promedio de 35 °C. En la noche a las 19 horas alcanza una intensidad de 1.2 mA y 0.52 V, cuando la temperatura del cuarto es de 13 °C.

Celda tipo C. Esta celda es idéntica a la anterior en cuanto a sus proporciones y contenido de materiales. Se varió la distribución y área de los electrodos. Los electrodos fueron dispuestos de manera vertical a manera de cepillo. El área de electrodos de cobre fue de 12.6 cm² y el área de electrodos de alambre galvanizado fue de 56 cm². La razón de la desproporción de las áreas se debe a las características de rigidez del material y a la presencia de baja conductividad del electrodo de alambre. Se pudo establecer que la celda alcanzaba en promedio 3 mA y 0.56 V a una temperatura promedio de 35 °C.

Celda tipo D. Fue construida como un paralelepípedo de 3 x 71x119 cm con marco de hierro lateral y refuerzos en el fondo. El fondo fue construido de tol con área expandida constituida por baffles inclinados de 3 cm de alto que sirvieron de soporte a tubería de ¼ de pulgada de cobre, en forma de serpentín, que fue uno de los electrodos. El área de electrodo de tol fue de 1.07 m² y la de cobre de 0.5 m². El panel se ubicó en la terraza de Química-Eléctrica. Produce alrededor de 45 mA y 0.45V a las 12 horas y 35 mA y 52 V a las 19 horas. La celda ha sido probada por cuatro meses. Los materiales utilizados fueron 12.3 lts de fluido orgánico, 10.55 kg de lutita 1.23 kg de glucosa, 0.245 kg de cangahua y 0.245 kg de piedra pómez. No se incluyó a la ilmenita y se consideró que los óxidos provenientes de la piedra pómez acondicionarían a la lutita

Mediciones

Se realizaron mediciones de intensidad de corriente a través de una resistencia de 10 Ω y de voltaje en los extremos de los electrodos de la celda (alambre de cobre y alambre galvanizado).

Se expusieron a cada una de las celdas a los siguientes procedimientos:

- Irradiación a temperatura constante (varias temperaturas de la superficie de la celda), con ambientación proporcionada con lámpara infrarroja e iluminación del cuarto (mediciones realizadas a las 10:00 horas).

- Irradiación solar a temperatura constante (varias temperaturas de la superficie de la celda), en ambiente protegido del viento. Las mediciones se realizaron al medio día.
- Para conocer el valor de la irradiación solar se procedió a cargar a la celda mediante la fuente de poder a cada temperatura estableciendo una coincidencia entre las curvas obtenidas por irradiación infrarroja y solar, por este procedimiento a cada temperatura.

Resultados

La figura 1, mediante la aplicación de la ecuación (2) ilustra la manera de determinar la constante capacitiva de la celda a la temperatura de 30 °C.

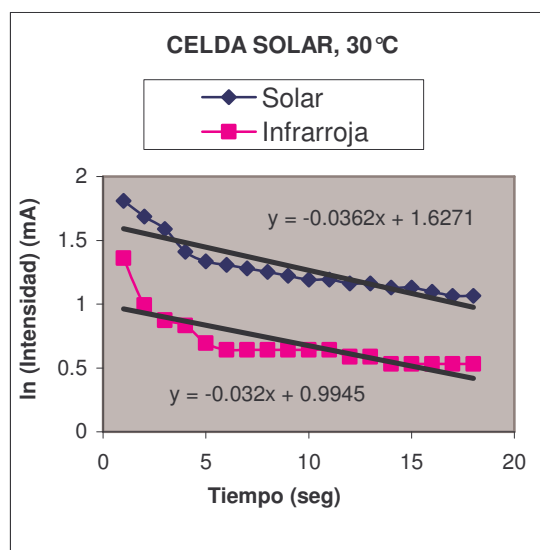


Figura N° 1

Solar: $i^0 = 5.08$ mA, $i_{\text{asintótica}} = 3$ mA, $C = 3F$, $R = 10.4 \Omega$, $t_{\text{descarga}} = 10$ seg

Infrarroja: $i^0 = 2.70$ mA, $i_{\text{asintótica}} = 1.7$ mA, $C = 3F$, $R = 10.4 \Omega$, $t_{\text{descarga}} = 5$ seg.

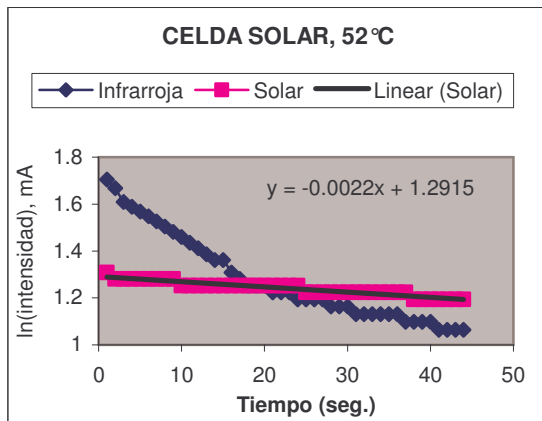


Figura Nº 2

Todo el espesor de la celda solar activado (recta), transporte difusivo de electrones. Curva superior decreciente transporte inducido por reacción (recombinación)

La Tabla 1 presenta los valores de la constante capacitiva, de la resistencia con la temperatura con la temperatura y de la corriente asintótica en la descarga

Tabla Nº 1

Valores experimentales celda, tipo C

T, °C	i_0 , mA	$i_{asintótica}$	$i_{promedio}$	C, μF	V_{carga}
30	5.08	3.3	4.2	3	0.57
40	6.00	3.8	4.9	3.2	0.54
49.8	2.60	1.8	3.8	3.8	0.55
52.4	3.63	3.5	3.6	4.37	0.50

La celda solar se carga con irradiación solar en alrededor de 5 s. a un voltaje promedio de 0.55 V. A ese valor se restablece la capacidad de descarga de la celda. La resistencia de la celda es constante y de un valor de 10.4Ω .

Se ha tomado como tiempo de descarga el tiempo que toma la celda en alcanzar un valor de intensidad de descarga ($i_{asintótica}$) que es aproximadamente estacionario.

Si se carga la celda con una fuente de poder a 3.6 V, 0.07 A, por dos segundos, a 52 °C se logra una intensidad inicial de descarga de 8 mA, seguido de un decaimiento lineal de 0.1mA por segundo durante 30 segundos, cuando empieza a hacerse el decrecimiento asintótico.

Conclusiones

De los datos experimentales se puede observar que el tiempo de carga de la celda es del orden de 5 segundos en promedio, con irradiación

solar. Los tiempos de descarga son variables, dependiendo de la resistencia de descarga. Si se considera la curva de la figura 2, a 52 °C, que presenta la temperatura que alcanza la celda en día lluvioso al mediodía. Para un diseño tentativo puede tomarse un tiempo de descarga de 10 s para lograr una intensidad media de descarga de 3.63 mA ($\exp(1.2915)$). La operación de la celda sería con un dispositivo de contacto y desconexión, pulsante, con una frecuencia de 10 s.

Una celda solar constituida por arreglos de las celdas tipo C, de 66 cm² de superficie produce 0.5 V y 0.00363 A. Diez celdas en serie producirían un agrupamiento que generaría 5 V y 0.00363 A. 15 de esos agrupamientos en paralelo conformarían un panel que generaría 5 V y 0.0545 A, cada 10 s, en una superficie de 9900cm². El arreglo podría funcionar sin interrupción 24 horas al día. Para acelerar la carga de las baterías se utilizarían arreglos del mismo material que las celdas solares discutidas en este informe preliminar, como acumuladores.

La transformación de energía térmica a eléctrica, en estas celdas amplia su versatilidad de uso puesto que en esta aplicación puede ser manejada con ventaja durante las noche. Resta por estudiar aplicaciones mixtas con energía térmica de otras fuentes tales como la proveniente de una lámpara infrarroja o de una fuente convectiva con fluidos térmicos.

El método de carga eléctrica continua directa por medio de una fuente de poder es un método empleado, en este estudio, para estimar indirectamente la energía susceptible de ser absorbida por la celda solar. El procedimiento independiza la estimación de la irradiación de los avatares del tiempo dentro de las mediciones y permite el cálculo de la energía absorbida por comparación. No se ha dedicado experimentación a esta manera de empleo del material sólido reportado en este estudio y puede ser motivo de un prospectivo ámbito de investigación a futuro.

Trabajo en curso

Se están realizando estudios para reducir el área de la superficie del panel solar por medios estrictamente geométricos dado que como el panel funciona más eficientemente a temperaturas elevadas (medio día) y la reacción se produce por volumen hace falta un estudio de transporte de calor para especificar un espesor adecuado de celda. Por otra parte,

la superficie protectora que es actualmente de vidrio podría reemplazarse por una de vinilo, como sucede en casi todas las celdas solares comerciales. Por otra parte no se ha seleccionado el mejor arreglo de material de los electrodos lo que permite un aspecto mayor de optimización.

Agradecimientos:

Al Departamento de Ingeniería Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información por su respaldo en la ejecución de esta investigación.

Al Sr. Ing. Oswaldo Buitrón B, Coordinador del Laboratorio de Prototipos Industriales

Al Sr. René Jame Romero, Auxiliar Técnico del Laboratorio.

Bibliografía

Timothy J. Anderson, " Chemical processing of electrons and holes", American Institute of Chemical Engineers. Materials Engineering and Sciences Division. Newsletter. Volume 26, No.2, 1965.

Chemical Engineering Progress, update, vol. 99, 11, 2003