

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FISICAS Y NATURALES**

**EL EFECTO FOTOVOLTAICO
Y SUS APLICACIONES**

DISCURSO

LEIDO EN EL ACTO DE SU RECEPCION

POR EL

EXCMO. SR. D. MAXIMINO RODRIGUEZ VIDAL

Y

CONTESTACION

DEL

EXCMO. SR. D. JOSE GARCIA SANTESMASES

EL DIA 3 DE DICIEMBRE DE 1986



MADRID

Domicilio de la Academia

Valverde, 22

Depósito Legal: M -40148 -1986

Fotocompuesto e Impreso por: Gráficas Lucentum, S. A. - Saturnino Calleja, 6 - 28002 Madrid - 1986

DISCURSO

DEL

EXCMO. SR. D. MAXIMINO RODRÍGUEZ VIDAL

Excmo. Señor Presidente,
Excmos. Señores Académicos,
Señoras y Señores:

Muy grande es el honor, Sres. Académicos, que me habéis concedido al designarme, más por vuestra benevolencia que por mis méritos, para ocupar un lugar entre vosotros; pero no le van en zaga a ese honor mi agradecimiento y satisfacción, ambos a la par, pues muy grande es la satisfacción que esta designación me ha producido y, como persona agradecida que me considero, no es menor el reconocimiento que os debo por haberme considerado digno de sentarme entre vosotros y capaz de cooperar, sin menoscabo, en vuestra tarea. Toda merced lleva consigo un compromiso y el mío, en este caso, es el de procurar hacerme acreedor a la confianza que en mi habéis depositado y estoy presto a colaborar en todas cuantas tareas me hayan de ser encomendadas; el hacerlo así más que una obligación constituirá, sin duda, para mi un nuevo motivo de satisfacción si, en ello, puedo mantener el prestigio de esta Real Institución.

En las obligadas reflexiones en este acto, uno de los más trascendentes y, sin duda, el más emotivo de mi vida profesional, no pueden dejar de estar presentes en mi mente todos aquellos maestros que influyeron de forma decisiva en mi preparación científica y humana, sobre todo aquellos que ya no se encuentran con nosotros: D. Julio Palacios, D. José

Baltá, D. Esteban Terradas, D. Ricardo Sanjuan, D. Sixto Cámara, D. Daniel Marín Toyos. Permitidme que con su recuerdo les rinda aquí mi pequeño pero sentido homenaje de gratitud. De entre ellos quisiera destacar dos nombres: el Prof. Palacios pues él fué el que, a través de sus magistrales lecciones de Termodinámica, supo despertar en mi el interés por el estudio riguroso de los fenómenos naturales y con ello desviar mi vocación de la Matemática hacia la Física; fué también a través de la asistencia a algunas de sus intervenciones en esta Academia como tuve mis primeros contactos con esta casa que hoy me abre sus puertas; y el Prof. Baltá que me inició en un campo, el Electromagnetismo, a cuyo estudio he dedicado gran parte de mi vida y bajo cuya dirección realicé mi primer trabajo de investigación.

Dentro de estos recuerdos me es obligado mencionar, y para mi es una satisfacción el hacerlo, al Prof. García Santesmases, a cuyo lado pasé casi la totalidad de mi vida de postgraduado hasta mi incorporación a la Universidad de La Laguna y con quien en todo momento continué, de una u otra forma, vinculado aun cuando los temas de investigación discurrieran por caminos distintos a los realizados inicialmente bajo su dirección. Como consecuencia de todo ello, junto con mi gran admiración y respeto al maestro, ha surgido una profunda y sincera amistad con la que me encuentro muy honrado. De D. José aprendí algo más que una serie, más o menos completa, de conocimientos de una materia específica; aprendí a valorar las cualidades necesarias para la dedicación a la docencia universitaria y a la investigación: tesón, respeto a la verdad, respeto a la justicia, adaptación a la disponibilidad del momento y esperanzador optimismo en el futuro, aun en aquellos casos en que estas disponibilidades están por debajo de las que podrían considerarse como imprescindibles.

Al incorporarme a la Academia vengo a ocupar la vacante producida por fallecimiento de D. José María Otero Navascues, hombre de gran personalidad, excelente científico y de unos atributos humanos no menos excepcionales. No tuve la suerte de tratar personalmente a D. José María, salvo el obligado saludo en una visita al LTIEMA en ocasión de ocupar él el cargo de Director y en alguna otra ocasión con motivo de asistir alguna de sus conferencias en el CSIC; pero su intervención en el desarrollo de la Física en España en aquella época de post-guerra y de reestructuración eran bien conocidas por todos los que estábamos iniciando, a finales de los años 40, nuestra incorporación al quehacer investigador.

D. José María Otero poseía una formación inicial castrense en donde posiblemente, tenían origen las excepcionales dotes de mando que le caracterizaban. En enero de 1928, a los 21 años de edad, es nombrado Teniente del Cuerpo de Artillería de la Armada con el número uno de su promoción. Muy pronto es comisionado para ampliar estudios en el Instituto Politécnico de Zurich, y seguidamente en las Escuelas de Optica de Jena y Berlín en donde permanece hasta julio de 1932. Durante esta época nace su interés por la Optica, rama del saber a la que habría de dedicar gran parte, y creo que la más importante, de su labor científica; particularmente en la Optica Fisiológica, en cuyo campo adquiere un merecido reconocimiento internacional.

Terminada la Guerra Civil es destinado, en calidad de Ingeniero, a un taller de recuperación y reparación de material de guerra, constituido fundamentalmente por instrumentos ópticos y sistemas de tiro. Aquí tiene ocasión de poner en práctica sus dotes creadoras y capacidad de trabajo y, con espíritu innovador que habría de ser característica permanente en todas sus actuaciones, hace que pronto, en 1944, de dicho taller surgiera un auténtico centro de investigación y desarrollo con el nombre de Laboratorio y Taller de Investigación del Estado Mayor de la Armada (LTIEMA), del que es nombrado inicialmente Subdirector y pocos años más tarde Director.

Simultáneamente, su interés por la ciencia pura le lleva a relacionarse con el naciente Consejo Superior de Investigaciones Científicas en cuyo desarrollo habría de intervenir de forma muy activa; para la fecha de creación del LTIEMA, Otero ocupa el cargo de Secretario de la Sección de Optica del Instituto de Física "Alonso de Santa Cruz"; Sección que muy pronto se convertiría en el Instituto de Optica "Daza de Valdés", del que Otero fué nombrado primer Director, y que ha sido origen de una numerosa y prestigiosa escuela de Optica con proyección internacional.

Ambos Centros, Instituto de Optica y LTIEMA estaban, lógicamente, íntimamente relacionados y de aquellas investigaciones realizadas en el primero que pudieran dar lugar a aplicaciones prácticas (fundamentalmente en cálculo de sistemas ópticos) se construían los correspondientes prototipos en el segundo. Algunos de estos prototipos eran fabricados, en relativamente pequeñas series, por la Empresa Nacional de Optica, S. A. (ENOSA), nacida también bajo los auspicios de D. José María. Esta inter-relación entre investigación básica, desarrollo e industria es

una clara manifestación de la visión que Otero tenía del papel que debería desempeñar el C.S.I.C. en el desarrollo industrial de la Nación.

Tuvo D. José María Otero, todavía, otra nueva ocasión de poner en práctica sus grandes dotes organizativas al intervenir, de forma muy decisiva, en un gran proyecto que culminó con la creación de la Junta de Energía Nuclear (JEN) en 1951, seis años más tarde de que hubiera tenido lugar la explosión de Irosima. De dicho centro ocupó la Presidencia a partir de 1958.

Aparte de las aportaciones de la JEN al desarrollo de otras ramas, como las de la química e ingeniería nucleares, para la Física en España iba a tener una importancia transcendental, la formación, por su iniciativa y ayuda, de un grupo excepcional de investigadores que han sido los promotores del alto grado de desarrollo de nuestra Física Teórica.

Fué preocupación constante de D. José María Otero el mantenimiento de relaciones con grupos de investigación en el extranjero, simultaneando las visitas cortas y de larga duración de investigadores españoles en centros del exterior y viceversa, e igualmente de promover investigaciones en otros centros (principalmente Universidades) subvencionadas por la JEN.

También en esta Real Academia se hizo notar su presencia por su gran actividad, durante los casi 40 años en que perteneció a la misma. En ella ocupó, a partir de 1968, el cargo de Secretario y luego el de Secretario Honorario cuando, por razones de salud, hubo de abandonar la actividad física.

No hay duda que la figura de D. José María Otero Navascues ocupará un lugar relevante en la Historia de la Física de España del siglo actual y su memoria, para aquellos que le trataron más íntimamente, vendrá reforzada por las virtudes humanas que, además, poseía en alto grado este gran hombre de ciencia.

EL EFECTO FOTOVOLTAICO Y SUS APLICACIONES

El fenómeno por el cual, cuando sobre un dispositivo incide radiación luminosa (en general cualquier radiación electromagnética), parte de la misma es absorbida y convertida en energía eléctrica, se denomina **efecto fotovoltaico**.

Este fenómeno es conocido ya desde hace cerca de 150 años, pero solamente desde hace poco más de 30 ha despertado un interés creciente tanto desde el punto de vista de investigación teórica como en el campo de sus aplicaciones, pasando de ser una mera curiosidad científica de laboratorio a una ciencia en plena madurez y con grandes perspectivas de futuro interés tecnológico. Me refiero a que de ser alcanzados los objetivos propuestos, la utilización de dispositivos basados en este fenómeno para la conversión de energía solar en energía eléctrica (células solares) que constituye la aplicación por antonomasia del efecto fotovoltaico, puede dar lugar, en un futuro próximo, a una tecnología de gran interés socio-económico.

El descubrimiento de este fenómeno fue realizado en 1839 por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel que ocupaba la cátedra de Física del Museo Nacional de Historia Natural de París, puesto que anteriormente había sido ocupado por su padre y que más tarde, a su fallecimiento, sería ocupado por su hijo Antoine-Henri, que en 1903 sería galardonado con el Premio Nobel de Física por su descubrimiento de la radiactividad.

En la sesión de la Academia de Ciencias de París del martes 30 de julio de 1839, la misma en que su presidente anunciaba el fallecimiento del

matemático Gaspar Riche, barón de Prony, Edmond Becquerel¹ presentó una memoria titulada “Recherches sur les effects de la radiation chimique de la lumiere solaire, on moyen des courants électriques”. En ella describe las experiencias realizadas de la siguiente forma: ...“disponiendo dos líquidos de densidades desiguales, ambos conductores de la electricidad, estando el de menor densidad superpuesto al de mayor densidad y uno de los dos líquidos contiene una substancia capaz de reaccionar, bajo la influencia de la luz, con otra contenida en el otro líquido; cuando se hace penetrar en la masa líquida la “radiación química”(*) se produce una corriente eléctrica acusada por un galvanómetro en el que sus bornes se conectan por dos hilos de platino a sendas láminas del mismo metal inmersas en cada uno de los dos líquidos”. A continuación da una explicación del mecanismo por el que se genera la fotocorriente por intercambio iónico a través de la superficie de separación y como ésta puede ser utilizada para detectar y estudiar la reacción entre diferentes substancias bajo la acción luminosa.

En una segunda memoria presentada a la Academia tres meses más tarde (4 Nov. 1839)² hace notar ya la influencia en las corrientes fotogeneradas de la naturaleza del electrodo y del hecho de que éste esté iluminado y, después de dar detalles del procedimiento para descartar las corrientes termoeléctricas, describe los resultados obtenidos sucesivamente con electrodos de latón y de plata, siendo con estos últimos, recubiertos de una capa muy fina de cloruro, ioduro o bromuro de plata, cuando los resultados obtenidos son más significativos. Utilizando filtros de colores entre el Sol (que es la fuente luminosa utilizada) y el electrodo obtiene una representación –aunque muy elemental– de la respuesta espectral, pero en parte concordante con lo que sería establecido un siglo más tarde cuando fuera conocida la teoría cuántica de la luz y la estructura de bandas en materiales, necesarias para confeccionar un modelo teórico del fenómeno. Por otra parte, ya indica la posibilidad de utilizar estas fotocorrientes para determinar la intensidad de la radiación solar incidente.

No existe contribución alguna, digna de tener en consideración, hasta cerca de cuarenta años más tarde en que se observa, por primera vez,

(*) Se creía entonces que la radiación luminosa estaba constituida por una superposición de diferentes tipos de radiación responsables, cada uno de ellos, de los fenómenos específicos observados.

el efecto Becquerel en sólidos, específicamente en Se^3 , material en el que se acababa de descubrir sus propiedades fotoconductoras⁴. Ambos efectos fueron utilizados posteriormente para la construcción de células fotométricas de Se de utilidad en fotografía.

Otra vez hubo de transcurrir un largo lapso de tiempo (más de 30 años) hasta que se obtuvieran nuevas aportaciones de interés. En 1908 Percy Hodge⁵ comunica a la Physical Society, en una reunión celebrada en Washington, la observación del efecto fotovoltaico (aunque no utiliza este nombre, ni hace referencia a observaciones anteriores) al estudiar algunas anomalías en la fotoconductividad de algunas soluciones fluorescentes, fenómeno que estudia posteriormente con detalle en las por él denominadas “células foto-activas con electrolitos fluorescentes”⁶, células sobre las que, años más tarde, se estudiaría el envejecimiento y la influencia en su comportamiento de la concentración del electrolito⁷.

Otro hito de interés en las aplicaciones fotovoltaicas en sólidos lo constituye la observación del fenómeno en la estructura rectificadora Cu/OCu_2 ^{8,9}. Pero el año decisivo en el desarrollo de las células fotovoltaicas fué el 1954, en que se inicia con pujanza una época de rápido crecimiento tanto en técnicas de fabricación como en la formulación de modelos teóricos y en el desarrollo de nuevas estructuras. En este año se publican resultados obtenidos por tres grupos de investigadores, independientes entre sí, que pueden considerarse como los fundadores de la moderna concepción de los dispositivos fotovoltaicos: Por un grupo integrado en la RCA^{10, 11} se establece de forma decisiva la posibilidad real, con rendimiento práctico, de la conversión de energía solar en eléctrica mediante la utilización de una célula fotovoltaica realizada mediante una unión p/n de Si monocristalino; otro grupo consigue, en los laboratorios de la compañía Bell, células de la misma naturaleza con rendimientos de hasta el 6%¹²; por otra parte en los Laboratorios de Investigación Aeroespacial de las Fuerzas Aéreas Americanas (U.S. Air Forces Aerospace Research Laboratory) se fabrica la primera célula de CdS^{13} , que sigue siendo todavía una de las que ofrece grandes posibilidades en el futuro.

El desarrollo de las células solares adquiere un gran impulso cuando éstas –aunque muy costosas– fueron utilizadas como fuente energética de las primeras naves espaciales (p.e. el Vaguard, primer satélite americano, en 1956). Aumentó este interés la aptitud tomada por los países productores de petróleo en octubre de 1972, actitud que provocó en las Agencias Nacionales responsables de la administración de los fondos dedicados a investigación de los diferentes países, a la inversión de can-

tidades considerables dedicadas a la busca de fuentes alternativas de energía. Por la misma causa surgen comités “*ad hoc*”, grupos de trabajo, simposia, conferencias periódicas, etc. encargados de analizar científicamente todas las posibilidades de las tecnologías que se van desarrollando, así como aconsejar las directrices en que, por parecer de futuro más prometedor, deben invertirse los mencionados fondos; unas veces por tratarse de estudios teóricos que pueden conducir a una mejor comprensión del fenómeno en sí y otras, las más, por tratarse de tecnologías que puedan conducir o bien a un mayor rendimiento en la conversión, un mejor rendimiento económico o una facilidad de consecución de mayor potencia eléctrica generada.

Modelo teórico del efecto fotovoltaico

El mecanismo por el cual la energía de radiación electromagnética absorbida por un dispositivo fotovoltaico es transformada en energía eléctrica puede resumirse como sigue:

La radiación absorbida por un semiconductor, en forma de uno o varios fotones de energía $h\nu$ se invierten en energizar un electrón del tope de la banda de valencia (prácticamente llena) haciéndole pasar a la banda de conducción (prácticamente vacía), originándose, de esta forma, un par de portadores “electrón-hueco”. Estos portadores, accionados por un campo eléctrico, se mueven en direcciones opuestas hasta los electrodos en los extremos del dispositivo, contribuyendo así a la producción de una corriente eléctrica exterior.

El dispositivo fotovoltaico ha de estar constituido, por tanto, por un material semiconductor en el seno del cual se ha de autogenerar un campo eléctrico responsable de la separación de las cargas, una vez generadas, para evitar su recombinación. Este campo eléctrico se produce introduciendo una inhomogenidad muy acusada en el semiconductor por medio de una homounión p-n (por ejemplo, entre otras, en células de silicio cristalino), una unión p-i-n, como sucede en las células de Si amorfo (a-Si), una heterounión (p.e., en las células de $\text{Cu}_x\text{S}/\text{CdS}$) o una barrera Schottky metal-semiconductor o una estructura MIS (metal-aislador-semiconductor). Todas estas estructuras tienen en común la existencia de:

a) Una o dos regiones neutras donde la radiación incidente crea los pares electrón-hueco. Estos portadores minoritarios se mueven hacia los

bordes de la capa vacía por un proceso de difusión y acción de un pequeño campo eléctrico.

b) Una zona o capa vacía de portadores en la que la carga espacial crea un campo eléctrico intenso que separa rápidamente los minoritarios que le llegan procedentes de los pares generados en la zona o zonas neutras así como también, lógicamente, los pares generados por la radiación en la propia capa vacía.

Cuando la carga exterior es cero, es decir cuando se cortocircuitan los bornes de la célula, se obtiene como corriente de salida la máxima corriente. Esta corriente de cortocircuito (I_{cc}) es ligeramente (en algunos casos notoriamente) menor que la corriente total debida a los portadores generados por la radiación incidente, debido a que antes de llegar a los bornes, los minoritarios generados han sufrido recombinaciones o atrapamientos en el seno de las zonas neutras y en las interfases con los electrodos.

Para el análisis del comportamiento de un dispositivo fotovoltaico para una frecuencia de la radiación incidente, se hace necesario introducir en el cálculo teórico del modelo antes descrito las características del dispositivo (coeficiente de absorción para esa frecuencia, determinación cuantitativa del perfil de potencial a lo largo de la zona vacía, o sea el campo eléctrico separador de las cargas, coeficientes de difusión y movilidad de los portadores, etc.), que nos permita establecer las ecuaciones de transporte de Boltzman y, con ello, obtener la característica $V-I$ del dispositivo. Al establecer estas ecuaciones de transporte se ha de tener especial cuidado de introducir, para cada material y circunstancias, los diferentes mecanismos de recombinación de portadores y otras pérdidas, debidas a diferentes causas, que dan lugar a un calentamiento del dispositivo, tales como el exceso de energía de los fotones sobre la necesaria para generar un par de portadores, absorciones no conducentes a generación de portadores, recombinaciones radiativas, etc.

Para una célula fotovoltaica, se hace necesario sumar los efectos debidos a las diferentes frecuencias incidentes, habida cuenta de la descomposición espectral de la radiación que llega a la célula. El espectro solar se asemeja al del cuerpo negro a la temperatura de 5762°K , el cual se utiliza para el estudio del comportamiento de la célula en el espacio exterior (AMO—Air Mass zero), con una intensidad de 1353 W/m^2 (14). La

absorción y “scattering” de la radiación por la atmósfera modifica substancialmente este espectro, tanto en la distribución de frecuencias, como en el de las intensidades respectivas. Para la superficie terrestre, con el Sol en el zenit (AM1), la intensidad es de 1070 W/m². Utilizando los datos obtenidos por Thekaekara (loc.cit) se ha establecido para el espectro solar el patrón AM1,5 (masa de aire=1,5 Atm.). Aunque para esta masa de aire correspondería una intensidad de 827 W/m², para uso como patrón se toma 1000 W/m².

Un análisis completo de la teoría para una célula de unión p-n, siguiendo el modelo antes descrito¹⁵, conduce a resultados que se adaptan bastante a los obtenidos experimentalmente para células monocristalinas de Si.

La característica I—V de una célula cae dentro del rectángulo fijado por los valores I_{cc} y V_{ca} (corriente en cortocircuito y voltage en circuito abierto) y presenta un punto de coordenadas I_{max} y V_{max} que corresponde al de máxima potencia de salida. El cociente (I_{max}·V_{max}/I_{cc}V_{ca}) se denomina factor de llenado (FF) y es un parámetro que representa el índice de aprovechamiento de la célula respecto del máximo valor que teóricamente es posible alcanzar con ella.

El rendimiento de la célula viene dado por la expresión : $\eta = (\text{Potencia máxima producida}) / (\text{Potencia luminosa incidente}) = (\text{FF} \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}) / \text{Pot. lum. en W}$. Este parámetro, el coste final, su duración y el resultado del balance energético global, son los aspectos a tener en cuenta en la elección de una célula en aplicaciones de conversión de energía.

Materiales y técnicas en células fotovoltaicas

El comportamiento de una célula fotovoltaica está muy condicionado por el material básico utilizado en su composición y por la tecnología utilizada tanto en su preparación como en el proceso de dopado. Asimismo se ve afectado por la estructura de la célula, el perfil de dopado y dopantes utilizados, tipo de ventanas frontales, campo en la superficie posterior, recubrimientos anti-reflectantes, impurezas extrañas, etc.

Los materiales absorbentes que constituyen la base de la célula se eligen entre aquellos que por su anchura de banda prohibida, resistivi-

dad, etc. conducen a valores adecuados del rendimiento. Figuran entre estos el Si, CdTe, GaAs, CdS, CuSe, InSe, etc. y sus compuestos. Inicialmente se utilizaron estos materiales (particularmente el Si) en estado monocristalino; hoy se están utilizando cada vez más profusamente en forma de láminas delgadas policristalinas e incluso en estado amorfo.

Los métodos más utilizados para el crecimiento de monocristales de uso fotovoltaico son, en esencia, los mismos que para materiales (Si o Ge) de uso en electrónica: el de Bridgman-Stockbors y prioritariamente el de Czochralski¹⁶ en el que el material fundido se encuentra en un crisol a una temperatura ligeramente por debajo del punto de fusión y con un pequeño gradiente térmico en dirección vertical; se introduce un pequeño cristal que sirve de "semilla" de cristalización y se extrae verticalmente hacia arriba muy lentamente a la vez que se le hace girar en torno a un eje vertical; el resultado es un lingote cilíndrico monocristalino de muy buena calidad, crecido por solidificación en la interfase sólido-líquido. El dopado principal se hace disolviendo en el material fundido el dopante, en la concentración adecuada de acuerdo con su coeficiente de distribución¹⁷. Las impurezas secundarias (para crear la estructura de la célula) se introducen posteriormente y en general por difusión o por implantación iónica. Este método de producción tiene el inconveniente que, debido a las altas temperaturas a que ha de mantenerse, el crisol comunica impurezas no deseadas al cristal. Más adelante, al describir algunos tipos de células, citaremos otros métodos de fabricación utilizados específicamente para ellas, pero que, por regla general, pueden ser aplicados a otras.

Los campos de trabajo en el terreno de las células fotovoltaicas en la actualidad están fundamentalmente enfocados, por un lado al estudio y mejora de los materiales y dispositivos que se consideran de mayor interés en un futuro próximo, de otro, a la mejora del rendimiento de las células en uso y a establecer límites de dicho rendimiento para cada estructura que permitan predecir las posibilidades de la misma.

Por lo que respecta al primero de dichos campos las actividades están orientadas en los siguientes tres caminos de carácter general: 1) estudio y mejora de los procedimientos de crecimiento de cristales semiconductores tanto en lingote como en láminas delgadas; 2) estudio

y producción de películas delgadas de semiconductores amorfos –principalmente Si–; y 3) películas delgadas de semiconductores policristalinos.

La selección del material adecuado para la construcción de células solares exige una serie de condicionamientos técnicos y otros, no menos importantes, de carácter económico. De ahí el interés que ha despertado últimamente el estudio de todos aquellos materiales que ofrecen posibilidades de ser candidatos a ser utilizados en células fotovoltaicas; los cuales, por otra parte han de ser ampliamente experimentados antes de que puedan ser objeto de fabricación a gran escala.

Probablemente, hasta la fecha, solamente hay dos materiales que habiendo sido ya muy utilizados en fabricación a relativamente gran escala, puedan considerarse capaces de garantizar un determinado comportamiento para poder hacer predicciones futuras tanto en lo que concierne a la cuantía de las inversiones como a la capacidad de producción y cualidades de las células construidas. Nos referimos a las células de unión p-n de Si y a las de heterounión $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ de lámina delgada. Existen, no obstante otros muchos materiales y estructuras que, al menos potencialmente, pueden ser considerados como futuros candidatos para su utilización industrial como fotovoltaicos, materiales que están siendo estudiados con interés y son objeto de numerosas publicaciones y discusiones en reuniones específicas.

Células de silicio. El Si es el material fotovoltaico mejor conocido en la actualidad y de uso más frecuente desde que, como ya hemos mencionado anteriormente, en 1954 fué utilizado por primera vez en la fabricación de una célula solar en los Bell Telephone Lab. Inc.^{12, 18} capaz de suministrar una potencia apreciable (60 W/m^2 de célula) y con mayor rendimiento (del orden del 6%) que todos los dispositivos entonces en uso¹⁹. En los mismos laboratorios se dio, casi simultáneamente, una teoría válida para el diseño de este tipo de células²⁰ que conducía a predicciones concordantes con los resultados experimentales.

No es de extrañar, dado el enorme desarrollo por el que atravesaban las técnicas de crecimiento, purificación y dopado de Si por sus aplicaciones en circuitos electrónicos, que esta célula de Bell (como se le denominó por su origen) alcanzase una producción rápida y fuera considerada por bastante tiempo como la única alternativa del campo; aún hoy,

por las inversiones enormes realizadas en la tecnología del Si y producción de células basadas en este material, se considera por algunos de muy difícil sustitución en un futuro próximo.

El Si monocristalino, con la pureza que se utiliza en electrónica es excesivamente caro para que las células que lo utilicen cumplan una de las metas de abaratamiento a las que se dirigen las investigaciones hoy en día para las células de aplicaciones terrestres, toda vez que la cantidad de material que este tipo de células conlleva es muy significativo y su coste es del orden del 30% del coste final del dispositivo, a diferencia de lo que sucede en la fabricación de dispositivos electrónicos en los que – como sucede en los circuitos integrados – la cantidad de material gastada en el proceso es tan ínfima, que es irrelevante en el precio final, a pesar de su elevado precio.

Existen diferentes procedimientos para reducir el coste del silicio utilizado, algunos de los cuales pueden utilizarse simultáneamente:

1) Reducción del espesor de la oblea generalmente utilizado de 250 a 300 μm . Tanto teórica como experimentalmente se ha demostrado^{21, 22, 23} que un espesor de 100 μm , con un campo retardador en la superficie de la cara posterior conduce a un rendimiento tan alto, y quizá superior, que la célula estándar n^+/p de 250 μm .

2) Utilización de un Si de calidad inferior, en cuanto a su grado de pureza, que el que es necesario para usos electrónicos. La naturaleza especial de la aplicación fotovoltaica permite esta posibilidad; incluso, por permitir la existencia de fronteras de grano, pueden ser utilizados semicristales o materiales policristalinos.

La influencia de diferentes tipos de impurezas metálicas en el comportamiento de las células solares de Si, fue estudiada con amplitud por Davis et al²⁴ creciendo cristales por el método de Czochralski con adición controlada de impurezas secundarias. Los dopantes primarios utilizados fueron Boro y Fósforo mientras que los secundarios fueron Al, B, C, Ce, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pd, Ta, Ti, V, W, Zn y Zr con concentraciones comprendidas entre 10^{10} y 10^{17} cm^{-3} . Las células fueron construidas por un procedimiento convencional de difusión térmica y sus características I–V se calcularon por ordenador. Las conclusiones alcanzadas establecieron que, fundamentalmente y en primer término, las impurezas afectaban al comportamiento de la célula a través de la disminución de la longitud de difusión, salvo en algunos casos (Cu, Ni, Fe) que a concentra-

ciones elevadas degradan la célula substancialmente por defectos estructurales y dan lugar a fenómenos de precipitación. En algunos casos (p.e. Cu en un material dopado primariamente con Ti) el efecto de ambas impurezas es aditivo mejorando, por tanto, su comportamiento.

Resulta difícil de determinar el máximo de concentración de impurezas permitido a causa de las siguientes consideraciones:

a) El rendimiento de la célula no debe disminuir excesivamente, ya que el precio del dispositivo depende también del número de células que sea necesario para los mismos fines. En general se admite una disminución de hasta un 10% del rendimiento que tendría una célula construida con Si electrónico.

b) La tolerancia, en cuanto a la máxima concentración de impurezas, compatible con el método de crecimiento del cristal.

c) Los cambios estructurales en cristal que pueda inducir la concentración de impurezas.

3) Utilización de procedimientos más económicos para la obtención del Si de partida para el crecimiento del cristal, con calidad suficiente para que sea utilizable en fotovoltaicos. Se han desarrollado varios procesos²⁵ en substitución del de Siemens, utilizado comúnmente para la obtención de Si de calidad electrónica, notoriamente más baratos y sin embargo susceptibles de ser utilizados en aplicaciones fotovoltaicas.

Las técnicas de producción de láminas delgadas de Si que se han de utilizar definitivamente en la fabricación de la célula entran dentro de dos categorías:

1) Obtención de un lingote monocristalino y seguidamente cortarlo por procedimientos mecánicos en láminas del espesor requerido, con pulido posterior (oblea).

2) Producción directa, utilizando diferentes técnicas de crecimiento²⁶, de hojas del espesor adecuado para ser utilizadas en la fabricación de la célula, salvo –si acaso– el recortado al tamaño deseado.

En el primero de los casos el lingote se obtiene generalmente por el procedimiento de Czochraolski (CZ) avanzado²⁷ que difiere del método original únicamente en el rellenado automático del crisol y la automatización del proceso, que conduce a un lingote de mayor diámetro. El método de fusión por zona flotante, que es muy ampliamente utilizado en la

obtención de cristales de alto grado de pureza, no es de uso muy frecuente por la dificultad de introducir durante el crecimiento el dopado deseado; no obstante tiene la ventaja sobre el CZ en que se evitan la contaminación introducida por las impurezas del crisol que contiene el Si fundido.

Se ha utilizado también recientemente, para la obtención de lingotes de Si de calidad fotovoltaica, el procedimiento de cange térmico (**Heat Exchange Method —HEM—**)²⁸ en un pequeño crisol dentro de un cambiador de calor a alta temperatura. En el fondo del crisol se introduce un pequeño cristal para que sirva de núcleo de cristalización; en el interior de dicho crisol se establece un gradiente térmico controlado mediante un flujo de helio gaseoso, de forma que la semilla de cristalización no llegue a fundirse. Se consigue así un lingote de Si casi-monocristalino y de calidad comparable, a efectos fotovoltaicos, (dentro de un 2%) a los obtenidos por el método CZ, pero notoriamente más baratos. La forma del crisol (evidentemente la misma que la del lingote) es corrientemente paralelepípedica, para el mejor aprovechamiento de la superficie de los paneles solares.

También se puede obtener lingotes utilizables para células solares, directamente por fusión, seguida de enfriamiento en moldes de grafito. El material así obtenido es policristalino de granos que pueden alcanzar gran tamaño. Este procedimiento, por su notorio menor costo y facilidad de fabricación masiva, constituye una auténtica promesa como método futuro de fabricación de Si fotovoltaico.

La utilización de Si en lingotes presenta el grave inconveniente de que, al tener que cortarlo en láminas delgadas de espesor comparable (y en ocasiones muy inferior) que el de la sierra a utilizar, la pérdida de material es, como mínimo, el 50% del material obtenido por una técnica muy costosa. Es esta la razón por la que se han desarrollado diferentes procedimientos de obtención de Si cristalino directamente en láminas del espesor en que vaya a ser utilizado. A continuación citamos solamente algunos de estos procedimientos:

Crecimiento por bordes definidos. (EFG—Edge-defined Film-fed Growth). Este procedimiento, utilizado ya desde 1972²⁹ ha sido aplicado al crecimiento de formas con simetría traslacional (tubos, láminas, etc.) de zafiro. Su aplicación al Si ha sido objeto últimamente de amplio desa-

rollo y detallado estudio, sobre todo en el "Solar Energy Research Institute" (SERI)^{30, 31}.

En este método de producción un molde de carbono, que tiene practicada una ranura de lado a lado, se sumerge parcialmente, con la ranura en posición vertical, en Si fundido de alto grado de pureza. El silicio, que moja al molde, asciende por capilaridad a través de la ranura y alimenta el crecimiento de una lámina cristalina (de sección transversal análoga a la de la ranura) que se va extrayendo lentamente hacia arriba. La forma de la sección de la lámina se controla, además de por la forma de la ranura en la parte superior del molde, por el valor de la tensión superficial, el gradiente de temperaturas y la velocidad de extracción de la lámina.

Se pueden fabricar así láminas en forma de cintas del orden de 0.5 mm de espesor y 5 cm de ancho que son extraídas a razón de 5 cm/min., pudiendo alcanzar longitudes de hasta 20 m; las cuales, debido a su flexibilidad, pueden ser enrolladas en un cilindro para su fácil manejo. Todo ello conduce a un material que puede ser utilizado de forma inmediata (incluso sin necesidad de posterior pulido) y de precio muy bajo (del orden de $2 \cdot 10^{-3} \$/\text{cm}^2$)³². Por otra parte, la orientación dominante de los granos monocristalinos obtenidos y el gran tamaño de los mismos hacen que estas láminas sean de gran utilidad en la fabricación de células solares con rendimiento comparables a las obtenidas a partir de lingotes monocristalinos³³.

Crecimiento de láminas dendríticas. (DWG.—Dendritic Web Growth)³⁴. Llamado así por la semejanza en la forma de crecimiento con las concreciones geológicas del mismo nombre. El método es, en cierto grado, semejante al anterior EFG, pero que no necesita el molde de carbono, origen de impurificaciones en el material producido. En este procedimiento actúan como gérmenes de cristalización dos alambres monocristalinos de Si (dendritas) que al ir creciendo constituirán los bordes de la lámina y que inicialmente están en contacto con Si fundido sobreenfrñado; al extraer lentamente la lámina sólida crecén, por cristalización, las dendritas y, por tensión superficial, se crea una lámina líquida entre ambas dendritas que al solidificarse contribuye al crecimiento de la lámina producto³⁵. A medida que va creciendo la película cristalina, su espesor va aumentando hasta alcanzar un valor determinado, controlado fundamentalmente por las condiciones térmicas del Si líquido. La cali-

dad de la lámina obtenida es análoga a las obtenidas por el método de Czochralski y con ellas se han logrado células de hasta el 15% de rendimiento³⁶.

Este método fué utilizado por la firma Westinghouse en 1966, en una planta piloto, para la producción comercial de células fotovoltaicas de 10% de rendimiento; pero debido a la baja demanda en aquella época hubo de paralizarse hasta que en 1977 se reanudó la producción³⁷.

Crecimiento de una cinta cristalizada a partir de otra policristalina. (RTR — Ribon To Ribon)³⁸. En esencia consiste en una técnica análoga a la de zona flotante. Se parte de una cinta de Si policristalina obtenida por otro procedimiento convencional (p.e. crecimiento de Si por CVD sobre una hoja de molibdeno y subsiguiente separación) que se somete a un barrido lento (~ 7 cm/min) de arriba a abajo, por un haz de luz concentrada procedente de un laser potente que produce la fusión de la lámina en una zona que seguidamente recristaliza de nuevo; con láminas de este tipo se pueden producir células de rendimiento del 14% que son susceptibles de mejora.

Una comparación de estos métodos entre si y con los convencionales de Czochralski y Fusión por Zonas puede verse en los trabajos de Schwuttke³⁹ y de Ciszek⁴⁰.

El rendimiento teórico que una célula solar de Si monocristalino, construida con los mejores materiales disponibles, puede alcanzar la cifra del 25%^{41, 42} y hasta un 27%⁴³ cuando la recombinación tanto superficial como en el interior se reduce a niveles extremadamente bajos y se eliminan todos los demás caminos de pérdidas; pero el valor real obtenido queda bastante por debajo de este valor ideal, siendo los valores máximos experimentales del orden del 18%⁴⁴, 18.7% y 19.1%^{45, 46}; esta diferencia es debida mayormente a consecuencias derivadas de efectos de dopados elevados, estrechamiento de la banda prohibida, alta recombinación en (y en las proximidades de) la superficie de la célula y, aunque en menor cuantía por ser más fácilmente minimizables por ser conocidos mejor los mecanismos de actuación, pero no despreciables, los defectos en los contactos y en los recubrimientos antireflectantes utilizados. Estas células de alto rendimiento están constituidas por homounio-

nes n^+/p^- de Si monocristalino obtenido por "zona flotante". Para disminuir la velocidad de recombinación en la superficie se crece SiO_2 en la cara frontal. El dopado se realiza por implantación iónica, técnica que demuestra ser muy eficaz por la ausencia de una capa muerta en la superficie y que, cada vez, es más ampliamente utilizada⁴⁷.

Mediante la aplicación de un modelo⁴⁸ que incluye la recombinación por efecto Auger, además de los antes mencionados de estrechamiento de la banda y recombinación superficial, pero que desprecia los efectos de los campos eléctricos resultantes de la falta de homogeneidad en la concentración de dopado, se han conseguido rendimientos de hasta el 20%^{49, 50} en células producidas de forma análoga a las antes mencionadas.

Actualmente se está realizando un gran esfuerzo para sobrepasar la barrera que parecía infranqueable del 20% de rendimiento para las células de Si monocristalino, con la esperanza de que este alto rendimiento pueda compensar su mayor coste respecto de las de láminas policristalinas y de Si amorfo obtenidas por otros procedimientos notoriamente más económicos⁵¹. Buena medida de este esfuerzo lo constituye la abundancia de trabajos teóricos y experimentales tendentes a establecer los límites máximos en el rendimiento, fijados por los diferentes procesos internos de recombinación en la célula, y posterior análisis para el diseño de la que reúne las condiciones óptimas para alcanzar estos límites^{52, 53}.

Células Solares de películas delgadas

Las células solares de películas policristalinas es uno de los tres tipos (junto con los monocristales y los sistemas de concentración solar) con los que se puede esperar alcanzar conversión de energía solar en eléctrica para usos terrestres a gran escala. Aunque la física básica, y por tanto el análisis y diseño de células, es mucho más complejo para películas que para monocristales, no obstante su uso ofrece dos ventajas importantes: 1. Que, debido a que el espesor requerido para la capa activa es del orden de dos o tres veces la longitud de absorción óptica (longitud a la que la intensidad decae a e^{-1}), el coste del material se reduce a una

pequeña parte del coste total de la célula (*). 2. Pueden diseñarse procesos de flujo continuo con grandes áreas de superficie útil. Estos procesos de fabricación de películas delgadas de forma continua y controlada implica un gran esfuerzo técnico y económico, pero una vez construidas son capaces de producción masiva y consecuente abaratamiento.

Aunque gran parte de las investigaciones que se han llevado a cabo sobre células de películas delgadas se han realizado en base a crecimiento epitaxial sobre monocristales o estructuras policristalinas de tamaño grande de grano, las ventajas reales de las películas delgadas residen en su producción sobre substratos amorfos o policristalinos de mucho menor precio; los cristalitas individuales que se producen son de buena calidad cristalográfica, pero están interrumpidos por numerosas fronteras de grano y, ocasionalmente, pequeños recintos vacíos; estas fronteras de grano son regiones desordenadas con gran densidad de defectos estructurales e impurezas segregacionales. Estas imperfecciones conducen a niveles energéticos fácilmente ionizables con la consiguiente distribución de carga eléctrica espacial que puede conducir a la creación de barreras de potencial que impidan o por lo menos dificulten el transporte de portadores. A la vista de estos inconvenientes, es lógico pensar que para que las películas que se obtengan sigan siendo de interés, habrá que fijar unas limitaciones básicas en su comportamiento óptico y electrónico así como en su configuración estructural, para que las mismas sean de aplicación en células fotovoltaicas prácticas. A grandes rasgos, estas limitaciones pueden resumirse como sigue:

1). El espesor de la capa absorbente debe ser suficiente para absorber la mayor parte de la iluminación solar, es decir, alrededor de dos veces la longitud de absorción. (p.e., para la absorción del espectro solar AM1,5 con energía por encima del borde de absorción ($h\nu > E_g$) en GaAs, se requiere un espesor del orden de $2 \mu\text{m}$; para el Si este espesor es 50 veces mayor).

2). En las fronteras de grano se pueden producir pérdidas considerables de portadores fotogenerados. Estos efectos pueden visualizarse

(*) El coste aproximado del material para el espesor mínimo requerido y capas "ventana" para varias células, se pone de manifiesto por la siguiente comparación con los valores dados en $\$/W$: Célula p-n de Si, 0,09; CdS/CdTe, 0,08; $\text{Cu}_x\text{S}/\text{CdS}$, 0,08; $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$, 0,21; CdS/InP, 0,32 y Au/GaAs, 0,25. Las hipótesis son: rendimiento del 10%, AM1,5 y precios para pequeños lotes, en $\$$ de 1981; no está incluido el coste de fabricación del material de partida ni el del substrato.

por el tratamiento intuitivo dado por Rothwarf⁵⁴ resultando que el tamaño del grano, para evitar pérdidas considerables, debe ser el de varias veces la longitud de absorción. Esta hipótesis simple y meramente intuitiva conduce a valores generalmente concordantes con los establecidos por métodos más rigurosos.

3). Las propiedades de conducción electrónica en láminas policristalinas son, en general, anisótropas como consecuencia de la anisotropía de la estructura granular, deben, por tanto, considerarse conductividades y movilidades tanto en dirección paralela al plano de la película como en dirección normal a la misma; normalmente la primera es menor que la segunda.

4). Generalmente en el crecimiento se produce una estructura fibrosa con el eje de la fibra normal al plano de la película, con una razón entre la dimensión transversal y longitud del grano comprendida entre 0,2 y 0,5. Con esta estructura se evitan algunos de los inconvenientes que introduce la morfología granular aunque introduce algún otro como la posibilidad de cortocircuitar los electrodos anterior y posterior de la célula.

La influencia que el tamaño del grano tiene en el comportamiento de la célula depende mucho del material utilizado; así, por ejemplo, para algunos materiales –particularmente para el Cu_xS y CuInSe_2 de zona prohibida de transición directa– puede observarse cómo, con granos de tamaño dos órdenes de magnitud más pequeños que en Si, se consiguen rendimientos análogos.

El interés despertado en los últimos años por la producción de películas delgadas policristalinas y el estudio teórico y experimental de sus propiedades queda bien patente por la profusión de trabajos en el tema que ha dado lugar a decenas de millares de artículos en revistas científicas y centenares de libros.

Los métodos más importantes entre los muchos que se han venido utilizando para la producción de láminas delgadas policristalinas con fines fotovoltaicos suelen ser objeto de especial dedicación en los abundantes libros publicados últimamente en los que, por otra parte, suele darse abundantes citas bibliográficas (véase p.e. Fahrenbruch y Bube¹⁵).

Existen algunos tratamientos en el proceso general de fabricación que son válidos para los diferentes métodos utilizados: a) temperatura del sustrato durante el proceso, b) velocidad de crecimiento del espesor de la lámina y c) tratamiento térmico posterior a la obtención de la película.

La temperatura del sustrato, es decir aquella en la que el flujo material se incorpora a la lámina, influye directamente en gran medida en la movilidad de los átomos o agregados atómicos que se depositan y, con ello, a la facilidad de orientación en su incorporación a la fase sólida de forma que la energía potencial del sistema sea lo menor posible, lo que redundará evidentemente en el tamaño del grano que, como hemos dicho anteriormente, es uno de los factores más determinantes en el comportamiento de la célula. Como medida de esta estrecha relación entre la microestructura de la lámina y la temperatura (representada por la razón entre la temperatura T_s del sustrato y la T_f de fusión del material) baste observar que para el Cd_3As_2 ⁵⁵ obtenido por evaporación en vacío, para $T_s/T_f < 0,4$ la película está formada por un material amorfo o de tamaño de grano muy fino; para el intervalo $0,4 < (T_s/T_f) < 0,5$ los cristales son de tamaño mayor y estructura columnar y para $T_s/T_f > 0,5$ se obtienen cristales equiaxiales. Estas tres zonas térmicas en las que aparecen estructuras morfológicas tan distintas son frecuentes también en otras técnicas de crecimiento de la película, particularmente en las obtenidas por "sputtering"⁵⁶.

La velocidad de crecimiento de la película influye desfavorablemente en el tamaño de grano porque el mayor flujo material en la superficie de crecimiento puede dar lugar a un fenómeno de saturación del mecanismo de acomodación ordenada⁵⁷.

López-Otero⁵⁸ ha obtenido la siguiente relación empírica del tamaño del grano (g) en función del espesor de la película (y), la velocidad de crecimiento (dy/dt) y la temperatura del sustrato (T_s) para una película de PbTe crecida epitaxialmente sobre BaF_2 por el método HWVE (Hot-Wall Vacuum Evaporation)⁵⁹

$$g = C_1 \cdot y \cdot (dy/dt)^{-C_2} \cdot \exp(-E/kT_s).$$

En donde C_1 y C_2 son constantes y E es una energía de activación térmica. Para el PbTe se presentan dos relaciones de g distintas bien definidas: Para $T_s < 450^\circ C$; $C_2 = 0,5$ y $E = 0,64$ eV; y para $T_s > 450^\circ C$; $C_2 = 0,67$ y $E = 1.80$ eV.

Para la mayoría de los semiconductores existe un intervalo de temperaturas bien definido (el extremo inferior del cual (T_e) se denomina Temperatura epitaxial), en el que sobre un determinado sustrato se puede conseguir crecimiento epitaxial, dando lugar a películas de alta calidad cristalográfica y por tanto de posible interés fotovoltaico.

Recientemente Romeo⁶⁰ ha utilizado un método para aumentar el tamaño del grano consistente en una modificación de la técnica de "reotaxia" desarrollada inicialmente por Rasmanis⁶¹. En esta técnica el semiconductor se crece sobre una lámina delgada metálica que se mantiene durante el proceso a temperaturas ligeramente inferiores a su punto de fusión. La alta movilidad alcanzada por los granos al depositarse dan origen a un aumento considerable de su tamaño: depositando CdTe, CdS, $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$, $\text{CuInSe}_y\text{T}_{1-y}$ sobre láminas de Pb, Bi, Sn se obtienen granos de tamaño superior a $10\ \mu\text{m}$. Sielkham⁶² ha desarrollado una variante de esta técnica para el crecimiento de Si sobre sustratos de Pt que es eliminado con posterioridad a la obtención de la película; además de un mayor tamaño de grano, se consiguen películas con menor densidad de defectos.

Células de CdS. Ya hemos dicho que la primera observación de la tradicionalmente conocida con el nombre de "célula de sulfuro de cadmio" constituidas por depósito sobre CdS de Cu, Ag u Au, fué publicada en 1954^{13, 63} y en esta misma época parece ser que ya se construía íntegramente por la técnica de películas delgadas.

La célula está formada por una heterounión de Cu_xS de tipo p y CdS de tipo n. A pesar de su denominación usual, el CdS no interviene en el proceso de absorción luminosa y por tanto no puede considerarse como el material básico de la misma ya que no es el generador de portadores. Esta heterounión, en la que el valor de x se aparta a veces significativamente del valor 2 que muy corrientemente se le atribuye, presenta una gran complejidad debido, por una parte, a que los dos materiales (Cu_xS y CdS) poseen diferentes anchuras de la banda prohibida, así como diferentes estructuras cristalinas y afinidad electrónica. La falta de acoplo cristalino en la interfase produce en la zona defectos que afectan notoriamente al comportamiento de la unión; en particular se produce una difusión de Cu en el CdS que da lugar a efectos de fotoionización que pueden controlar los fenómenos de transporte a través de la unión; por otra

parte, esta migración puede ser responsable de la creación de módulos de cobre que perturban notoriamente el comportamiento eléctrico⁶⁴. Además, a temperatura ordinaria, el Cu_xS se presenta en una variedad de fases, cada una con diferentes propiedades fotovoltaicas, que pueden intercambiarse durante el proceso de fabricación.

A pesar de todas estas dificultades, esta célula es objeto de gran interés en la actualidad debido principalmente a la simplicidad de su proceso de fabricación y a su alto rendimiento, que la hacen muy prometedora. El procedimiento de fabricación más corrientemente utilizado consiste en la obtención de una película de CdS por evaporación en vacío o simplemente por "spray" pirolítico que a continuación se sumerge durante un breve período en una solución acuosa de iones cuprosos, durante el cual, por sustitución, se forma una capa de Cu_xS muy delgada (del orden de 0,1 a 0,3 μm). El proceso se complementa con un tratamiento térmico posterior, durante el cual, por difusión del Cu, se forma una capa de Cu_xS en la región del CdS.

Como alternativa a este procedimiento "húmedo" de fabricación, se han producido células de Cu_x/CdS por deposición, en vacío, de una finísima capa de CuCl sobre la película de CdS, obtenida previamente por evaporación en vacío, y subsiguiente tratamiento térmico^{65, 66, 67}. Últimamente se ha venido dando importancia a la obtención de este tipo de células "secas" por el método de "sputtering RF"^{68, 69, 70 71}.

En 1960 Williams y Bube⁷² estudian la electrodeposición de varios metales sobre CdS que no tratan térmicamente para evitar (o al menos disminuir) la difusión de Cu (que fué el metal de mejor respuesta) y ofrecen, por primera vez, un modelo basado en la fotoemisión del Cu de la heterounión, en contra del anteriormente establecido que suponía al CdS la fuente principal de fotoportadores. Esta última hipótesis se trata de revitalizar pocos años más tarde^{73, 74}. El problema queda parcialmente resuelto cuando Cusano⁷⁵ y Keating⁷⁶ sugieren independientemente un modelo en que el Cu_xS forma una heterounión con el CdS, que culmina finalmente en 1967^{77, 78} al dar definitivamente al Cu_xS la función básica de generar los fotoportadores. Un año más tarde^{79, 80} se establece la conveniencia del tratamiento térmico para mejorar la calidad de la célula.

También fué objeto de gran controversia el mecanismo por el cual se controla el flujo de electrones fotoexcitados inyectados desde el Cu_xS al

CdS y el de los portadores en sentido inverso. De los diferentes modelos estudiados ha sido adoptado finalmente el que dicho transporte de portadores está regulado por recombinación⁸¹ y/o efecto túnel a través de los estados de energía a uno y otro lado de la unión en la interfase⁸².

Tampoco son bien comprendidos los procesos que provocan los cambios observados experimentalmente en la respuesta espectral de esta célula cuando son tratados térmicamente después de su fabricación^{83, 84}.

Casi todos los fenómenos observados en esta heterounión lo han sido también, aunque en menor grado, en otros sistemas, en particular en las células de Si; pero en el $\text{Cu}_x\text{S}/\text{CdS}$ se presentan tan magnificados que sus resultados en otros materiales se considerarían patológicos.

Los procesos de formación de la unión, tanto por vía "húmeda" como por vía "seca" tampoco son todavía bien comprendidos. Los fenómenos de transporte están ahora empezando a ser entendidos, pero no se conoce lo suficiente sobre los centros de recombinación en las proximidades de la interfase, así como los efectos cuantitativos del tamaño de grano, sobre los fenómenos de transporte; e igualmente son insuficientes los datos que se tienen sobre la estabilidad; todo ello justifica la profusión de trabajos en torno a diferentes aspectos de estas células. Por otro lado, la combinación fortuita de los muchos factores no suficientemente controlados, hacen del proceso de fabricación de las células de CdS una mezcla de ciencia y alquimia.

Células de CdTe. El telururo de cadmio es un material que reúne teóricamente unas condiciones óptimas para ser utilizado en células solares: presenta una anchura de su banda prohibida de transición directa (1,47 eV), ligeramente por encima del máximo del espectro solar en la Tierra, propicio a que de lugar a un alto rendimiento⁸⁵ en aplicaciones terrestres; posee un elevado coeficiente de absorción óptica, que permite la utilización de pequeñas cantidades de material en la fabricación de la célula⁸⁶ que compensan la relativa escasez del mismo; y, por último, el hecho de que pueda ser dopado en ambos tipos "p" y "n", abre la posibilidad de fabricación de células de homounión, además de heterouniones y barreras-Schottky. No es de extrañar, por tanto, que sea muy abundante la bibliografía concerniente a este material como básico en Células Fotovoltaicas^{87, 88}. Es sorprendente, no obstante, que a pesar de los

prometedores resultados obtenidos con homouniones fabricadas por CSVT^{89, 90} es relativamente escaso el trabajo realizado en este sentido comparado con el amplio desarrollo en heterouniones formadas por depósito sobre láminas mono o poli-cristalinas de p-CdTe de capas ventana de diferentes tipos de materiales de alta conductividad y diferente anchura de banda prohibida con perspectivas prometedoras: Óxido de Zinc (3.3 eV)⁹¹ depositado por "spray" pirolítico, con rendimiento del 8.8%; Dióxido de Indio y Estaño (ITO) (3,0 eV) depositado por pulverización catódica⁹² o por haz electrónico⁹³ con rendimientos del 8% y del 10.5% respectivamente; Sulfuro de Cadmio y Zinc (2.4 eV) obtenido por "Spray"⁹⁴ con el 7.8% de rendimiento y, fundamentalmente, Sulfuro de Cadmio (2.3 eV) por Evaporación en Vacío^{95, 96} —rendimiento del 7.9%, por CVD (Close Vapor Deposition)⁹⁷ —rendimiento del 11.7%; por Spray pirolítico⁹⁸ —rendimiento 6%; por Evaporación⁹⁹ —rendimiento 8.7%; etc.

Prácticamente todas las técnicas de películas delgadas han sido utilizadas en la obtención de CdTe policristalino para ser utilizado en células solares, alguna de las cuales puede ser de interés futuro por su poco costo, facilidad de fabricación y posibilidades de áreas relativamente grandes: electrodeposición¹⁰⁰, "screen printing"^{101, 102, 103} y otras; pero la que parece tener mayores perspectivas de futuro es la CSVT (Close-Spaced Vapor Transport) ideada por Nicoll¹⁰⁴, con la que se han obtenido las células de CdTe de mayor rendimiento (superior al 10.5%) tanto por depósito en monocristales (BARBEE et al. ref. [89]) como en células CdS/CdTe en que ambas películas se han obtenido por esta técnica¹⁰⁵. Utilizando esta técnica se han obtenido recientemente homouniones mediante depósito de n-CdTe sobre monocristales p-CdTe¹⁰⁶.

Aparte de investigaciones con heterouniones Cu_xS/CdTe análogas a las obtenidas con CdS, tanto sobre p-CdTe¹⁰⁷ como sobre n-CdTe¹⁰⁸ y barreras Schottky de Pt/n-CdTe¹⁰⁹ se han obtenido células con película activa constituida por n-HgCdTe que pueden resultar de interés¹¹⁰.

Son varios los aspectos que faltan por mejorar y dificultades que vencer en la obtención de películas delgadas de CdTe, entre ellos cabe destacar la mejora del control de nucleación de la película, su estequiometría que en algunos procesos como el de pulverización catódica es muy difícil de mantener y la elección adecuada de dopantes, sobre todo para

el material tipo p. Una de las mayores dificultades es la obtención de películas de baja resistividad, en particular en p-CdTe. La elevada energía de extracción, (5.7 eV) hace que no se puedan conseguir contactos de baja resistencia con ningún metal simple; contacto que, por otra parte, no es de tipo ohmico debido a la inclinación de la superficie de Fermi en la unión¹¹¹. Se hace necesario recurrir a un alto grado de dopado del semiconductor con el fin de reducir la anchura de la barrera Schottky y realizar el contacto ohmico por efecto túnel¹¹². En la práctica ello origina una nueva dificultad: la obtención de p-CdTe con niveles muy altos de dopado.

Células de CuInSe₂. El selenuro de cobre e indio es un material básico en aplicaciones fotovoltaicas a causa de su gran poder de absorción para la radiación solar y poseer, por otra parte, una adecuada anchura de la banda prohibida (próxima a 1 eV); es, además, uno de los pocos materiales utilizados para la fabricación de células solares, en láminas delgadas, con rendimientos superiores al 10%¹¹³. Sin embargo, algunas de sus propiedades no son todavía bien conocidas, lo que justifica el interés últimamente despertado¹¹⁴. Es de principal importancia el papel que desempeñan las imperfecciones en el seno del cristal, el orden en que éstas aparecen en el proceso de producción, así como el método de producción en sí o posterior tratamiento, y las transiciones experimentadas entre las fases sólidas (por lo menos tres) en que cristaliza.

Se han identificado dos regímenes de temperatura a los que ocurre *transición de fase*: uno de ellos¹¹⁵ a los 810°C y el otro a 665°C¹¹⁶. Las estructuras cristalinas por encima de los 810°C y por debajo de los 665°C están bien identificadas como de tipos "zincblenda" y "calcopirita" respectivamente; pero la fase entre estas dos temperaturas no es bien conocida. Bachmann et al¹¹⁷ da más detalles sobre las relaciones de fase del sistema Cu-In-Se, pero no en el intervalo de temperaturas entre 665°C y 810°C. En todos los casos de crecimiento de cristales a partir de material fundido¹¹⁸, se han encontrado múltiples fracturas que se supone son debidas a los fenómenos de transición de fase.

Son varias las técnicas utilizadas para la producción de CuInSe₂ tanto en monocristales como en películas delgadas (V. el vol. 16 (1986) de "Solar Cells" antes citado)^{119, 120, 121}. Recientemente Ciszek et al¹²² han crecido cristales de CuInSe₂ en prácticamente todo el intervalo de temperaturas y los cristales obtenidos fueron, en cada caso, caracterizados

mediante varias técnicas de medida para determinar su composición y propiedades eléctricas y cristalográficas. Utilizaron para este estudio las siguientes técnicas de crecimiento:

1) A temperaturas por encima de los 810°C, mediante técnica LES (Liquid Encapsulation Synthesis) en recinto abierto, obtuvieron cristales sintéticos que fueron cristalizados o bien por solidificación direccional de Bridgmann/Stockborger o por la técnica LEC (Liquid Encapsulation Czochralski). Las propiedades eléctricas, estequiométricas, cristalográficas, etc. demuestran que los cristales obtenidos son de alta calidad, pero que para su utilización definitiva como básicos en células se necesita todavía proseguir estas investigaciones encaminadas a conseguir un control entre el dopado y la resistividad, caracterización de defectos, crecimiento de cristales de mayor tamaño (los obtenidos son del orden de 17 mm) y evitar las fracturas durante el proceso de enfriamiento; todo ello conducirá a poder establecer cuales son las velocidades óptimas tanto en el crecimiento del cristal como en su enfriamiento.

2) Entre 665°C y 810°C utilizan la técnica CVT (Chemical Vapor Transport) a partir de CuInSe_2 sintético y Yodo cristalino, encerrado ambos en una ampolla vaciada a 10^{-4} Torr y sometida a una oscilación térmica adecuada (Ref. [122], p 14-16). Los cristales obtenidos presentan diferentes morfologías que un análisis por rayos X prueba que pertenecen a una estructura de calcopirita. Todos los cristales obtenidos son de tipo p, lo que los hacen utilizables para células de heterouniones con ventana de CdS; presentan un amplio rango de resistividades todavía no explicado (de 1 a 650 ohm. cm.) y una movilidad, medida por efecto Hall que, para los de mayor resistividad, se cifra en $15 \text{ cm. s}^{-1} / (\text{V. cm}^{-1})$.

3) Por debajo de 665°C se han obtenido cristales de CuInSe_2 por primera vez (Ref. [122] p. 20-25), utilizando la técnica de crecimiento hidrotérmico para sulfuros y selenuros inorgánicos iniciada por Rabenau y Rau¹²⁴, aunque modificando ligeramente el método operativo. Los cristales forman dos agregados de material policristalino en la fase calcopirita, uno en la parte superior de buena estequiometría y otro, no estequiométrico, en la inferior del tubo de cuarzo utilizado en la experiencia. La particularidad más importante que presentan los cristales así obtenidos es que están exentos de tensiones y que, por tanto, pueden ser utilizados para la fabricación de dispositivos. Su tamaño es pequeño pero es susceptible de aumentarse utilizando un núcleo de cristalización; presentan

una resistividad de 6 ohm. cm. y una concentración de portadores tipo p del orden de $10^{16}/\text{cm}^3$.

Células de GaAs. La anchura de banda prohibida que presenta el GaAs (1.43 eV) cae dentro de los límites establecidos como óptimos (de 1.4 a 1.6 eV) para materiales que hayan de ser utilizados en el espacio libre (iluminación AM0)¹²⁴. Esta circunstancia justifica la atención últimamente prestada a este material, sobre todo en forma de película delgada. Dicha película puede ser utilizada tanto en estructura policristalina como monocristalina obtenida esta última bien por crecimiento epitaxial sobre sustratos adecuados (Ge comúnmente) o sometiendo la película obtenida por algún otro procedimiento a un proceso de recristalización posterior.

Se han utilizado homouniones p/n de GaAs^{125, 126, 127} con excelentes resultados, pero que presentan dificultades al tener que evitar la intensa recombinación superficial que produce una disminución muy apreciable de la corriente en circuito abierto. Este defecto se puede subsanar utilizando una unión muy superficial (a una profundidad aproximada de 1000 Å)¹²⁸ o utilizando una heterounión AlGaAs/GaAs con un espesor de AlGaAs muy pequeño¹²⁹. Recientemente¹³⁰ se ha ideado un procedimiento por el cual, mediante un proceso de difusión de Zn en el GaAs obtenido por CVD se pueden producir uniones p⁺/n utilizables en células solares con suficiente buen rendimiento, aunque no tan alto como las obtenidas mediante sustratos epitaxiales, pero que pueden ser de utilidad por su bajo precio. Se utiliza como fuente una película delgada de SiO₂ dopado con ZnO de espesor 750 Å y una capa vítrea de fosfosilicato de 3200 Å. Ambas capas son eliminadas después de realizada la difusión y en su lugar se deposita una capa antireflectante. Con una innovación de este método¹³¹ se consigue mantener protegida constantemente la capa de GaAs, realizándose todo el proceso (crecimiento de la película, difusión y subsiguiente depósito de la capa antireflectante y cubierta protectora) en una sola operación de CVP.

Es, sin embargo, la heterounión AlGaAs/GaAs la estructura más utilizada últimamente para la producción de células con material básico de GaAs especialmente orientadas a uso espacial^{132, 133}.

Otra heterounión que puede ser considerada de interés es la nZnSe/pGaAs. Ambos materiales el ZnSe y el GaAs tienen afinidades electró-

nicas prácticamente equivalentes (4.09 eV y 4.07 eV respectivamente) que hace que la estructura de su heterounión sea muy próxima a la óptima para una célula solar. Se han estudiado las propiedades de este tipo de células producidas por crecimiento epitaxial en fase líquida de GaAs sobre sustratos de ZnSe a temperaturas entre 750 y 800 °K¹³⁴ así como las producidas por crecimiento de ZnSe sobre GaAs en fase de vapor con dietileno de Zinc en fase de vapor y H₂Se en flujo de hidrógeno mediante técnicas MOCVP (Metal Organic Chemical Vapor Deposition)^{135, 136}.

Ultimamente¹³⁷ se ha elaborado un modelo aplicable a homouniones de GaAs, tanto monocristalinas como policristalinas, que concede ventajas a la configuración n/p sobre la p/n más corrientemente utilizada y con el que se predicen mejoras sustanciales en el comportamiento de células por él diseñadas sobre los resultados previos experimentales, incluso aquellos en que se ha conseguido mayor rendimiento¹³⁸.

Aunque este tipo de células ofrecen un rendimiento elevado, es necesario más trabajo de investigación encaminado a la reproducibilidad y optimización de las mismas^{139, 140}. Por otra parte, dado su elevado coste, tanto de material como de fabricación, es aconsejable su aprovechamiento en montajes con dispositivos colectores y en células tandem^{141, 142, 143}.

Células de InP/ITO. El fosforo de indio, a pesar de que ofrece muchas de las ventajas del GaAs, se le ha concedido mucha menor importancia como posible material fotovoltaico. En el "Solar Energy Research Institute" (SERI) se han desarrollado últimamente trabajos enfocados al estudio de la velocidad de crecimiento¹⁴⁴ y dopado del sustrato¹⁴⁵ de InP depositados por pulverización catódica de RF sobre ITO, así como al análisis para optimizar el rendimiento de la célula así obtenida¹⁴⁶.

Células solares de lámina gruesa. Un proceso típico para la formación de una célula solar de Si con tecnología de lámina gruesa puede resumirse como sigue:

Se parte de una lámina de Si monocristalino (oblea) de 300 a 500 micras de espesor. Mediante un comido ácido o alcalino se rebaja alrededor de 50 micras de cada lado de la oblea. Para la producción de la célula

se utiliza un lavado simple durante 10 minutos en ácido nítrico caliente y, después de un baño en agua desionizada, se sumerge en una solución de ácido fluorhídrico al 5%; se le aplica una capa de pasta fosforosa y se deja secar. Mediante una correa transportadora se le hace circular por el interior de un horno en donde se mantiene a 910°C durante 10 minutos para producir por difusión, una capa n^{-} . Esta difusión se realiza en zonas separadas: la primera en una atmósfera de aire para quemar la materia orgánica, después se pasa a una atmósfera de N a alta temperatura. La pasta, a la salida del horno, constituye una capa vidriosa que se suprime con fluorhídrico al 48%. Para suprimir las uniones parásitas de los bordes, se tratan con tetracloruro de carbono (CF_4); seguidamente se recubre por centrifugación de una capa antireflectante (dioxido de titanio). Los contactos frontales se realizan con pintura de plata y tratamiento térmico a 810°C . La cara posterior se pinta de aluminio y se le somete durante 10 minutos a 530°C ; sobre esta metalización, debido a que el aluminio no es soldable directamente, se pintan los electrodos de plata-paladio que se calientan durante 12 min. a 700°C .

Los fenómenos físico-químicos de las diferentes etapas son bien conocidos y los parámetros son en general muy críticos¹⁴⁷, sobre todo en el tratamiento de la metalización de los electrodos en la superficie frontal¹⁴⁸. La aleación Al-Si en la cara posterior produce un campo eléctrico superficial que produce una elevación efectiva del potencial en circuito abierto, V_{oc} , que puede llegar hasta 617mV, así como de la corriente en cortocircuito, I_{cc} . Los rendimientos son del orden de 12.5% y el factor de llenado $FF = 73\%$.

La tecnología de películas gruesas, mediante procesos de impregnación y tratamientos térmicos, ofrecen la ventaja del bajo costo del proceso en sí y de la relativa facilidad para producción de células en gran escala¹⁴⁹. Las primeras células de heterouniones CdS/CdTe fabricadas con estas técnicas¹⁵⁰ presentaban un bajo rendimiento (alrededor del 3%); pero recientemente se han obtenido no sólo rendimientos muy alentadores del 9%¹⁵¹ y del 12,8%¹⁵² sino que también se ha logrado una excelente estabilidad¹⁵³ que las convierten en candidatos muy prometedores para células baratas y de producción másica.

Se han obtenido y estudiado¹⁵⁵ células de $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ obtenidas por "spray" con rendimientos medios comprendidos entre el 6% y el 7,4%.

Células fotoelectroquímicas. A pesar de que el efecto fotovoltaico fué observado originariamente en sistemas electroquímicos, específicamente en electrolitos con electrodos metálicos, este tipo de “células húmedas”, constituidas por la unión electrolito/semiconductor, fueron descartadas como fotogeneradores energéticos debido al rápido y prolífero desarrollo de las células sólidas construidas a base de uniones de semiconductores. No obstante últimamente se han venido tomando en consideración sus posibles aplicaciones fotovoltaicas¹⁵⁵ siendo muy abundante la bibliografía de los desarrollos logrados en la última década^{156, 157}. Su bajo coste puede llegar a compensar los diversos inconvenientes que presentan, de los cuales el más importante es su corto período de vida por mor de la corrosión experimentada por los electrodos.

Células a base de materiales polímeros. El poliacetileno $(CH)_x$ presenta una anchura de banda de alrededor de 1.6 eV y puede ser dopado tanto en tipo “n” como “p”. Se puede obtener con ellos homouniones o heterouniones con otro material (específicamente con ZnS y CdS) así como barreras tipo Schottky con Ba utilizables en células fotovoltaicas. Los resultados obtenidos hasta ahora son muy pobres debido a la pequeña longitud de difusión para los minoritarios¹⁵⁸.

Se obtienen mejores resultados con polímeros de nitruro de azufre $(SN)_x$ que presentan las características de un semi-metal de baja resistividad (del orden de 10^{-3} . Ω cm.) a temperatura ordinaria y que tienen un trabajo de extracción elevado y muy adecuado para sustituir a los elementos metálicos en las barreras tipo Shottky^{159, 160}. Cuando se utilizan estos polímeros en células polímero/semiconductor se consigue una mejoría substancial en el potencial en circuito abierto respecto de las análogas metal/semiconductor.

Células de silicio amorfo (a-Si). La estructura de bandas de los materiales amorfos está caracterizada por la existencia de niveles energéticos en la banda prohibida correspondiente al estado cristalino, lo que explica tanto sus propiedades eléctricas como de absorción óptica.

En el caso del a-Si estas propiedades son notoriamente dependientes del método de fabricación, dependencia que en un principio se trató de explicar bajo la hipótesis de que el procedimiento de obtención era

el único proceso que influye en el perfil de densidad de estados en la banda prohibida. Posteriormente la aparición de estos estados energéticos se asocian a dos causas fundamentales: unos que aparecen como defectos "intrínsecos" de la "red elemental local" del material amorfo (*), los cuales están localizados en las proximidades de los bordes de la banda y otros, localizados más profundamente en la banda, estados "estructurales", que tienen su origen en el métodos de producción, impurezas, etc.

La incorporación de nuevos tipos de átomos –principalmente de H– que se incorporan fundamentalmente a los enlaces "dangling" producen cambios muy marcados en el comportamiento del material; en particular la saturación de dichos enlaces reduce a tal extremo los estados energéticos de nivel profundo que aparece, prácticamente, una banda semi-vacía de estados que da lugar a la posibilidad de dopado del material¹⁶¹ y, por tanto, a la de fabricación de células fotovoltaicas^{162, 163, 164}.

Las estructuras de unión p-n convencionales no son aplicables a células con a-Si debido a que solamente el 1% de los átomos dopantes son eléctricamente activos, lo que, unido a las distorsiones estructurales asociadas al proceso de su incorporación, reduce extraordinariamente la movilidad de los portadores minoritarios, tanto en n-(a-Si) como en p-(a-Si). Esta falta de movilidad se compensa, por un lado aprovechando la mayor absorción luminosa (40 veces superior a la del Si policristalino) que permite utilizar, con eficacia, espesores inferiores a 0.01 μm . y, por otro, mediante un diseño específico de la célula¹⁶⁵.

Se han ideado diferentes estructuras utilizables en células con a-Si: hererouniones^{166 a 171} barreras Schottky¹⁷², uniones MIS (metal-aislador-semiconductor)¹⁷³ y más corrientemente uniones p-i-n^{(12 a 16), 174, 175, 176} que presentan una mayor estabilidad, sobre todo frente a las MIS y Schottky. Con el fin de un mejor aprovechamiento de la energía luminosa absorbida, se utilizan sucesivas células en serie con anchuras de banda creciente a medida que se profundiza (células en "tandem") con lo que se controla la frecuencia de la radiación absorbida en cada etapa y así

(*) Los átomos de Si en el estado amorfo no están completamente desordandados, como en un principio podría suponerse, sino que están agrupados en cadenas relativamente largas que no poseen la simetría traslacional característica del estado cristalino. Por contra la posición de cada átomo está ligeramente girada respecto del pre-cedente, lo que determina que al final se rompa la cadena quedando los extremos con electrones de valencia no compensados (enlaces o átomos "dangling").

evitar la pérdida de energía en forma térmica por exceder de la necesaria para crear el par electrón-huevo. Con estas técnicas y utilizando un modelado por capas¹⁷⁷ se establecen posibilidades de rendimientos en la superficie terrestre (AM-1) del orden del 16% para células de a-Si: H/Si-policristalino y en un 20% para las células de a-Si: H/Ge-policristalino. El mejor rendimiento, hasta la fecha, parece ser del 12,5%¹⁷⁸, para el primer tipo de células.

Para la producción de las películas, tanto del a-Si: H como del a-Si: C, los dos materiales más frecuentes, se han utilizado en primer lugar la de "Glow Discharge" (descarga en plasma), primeramente en c.c. y hoy más corrientemente en RF, y la de pulverización catódica en RF.

En los últimos años el interés por las células fotovoltaicas construidas tomando como base el Si amorfo ha alcanzado unas cotas insospechadas, hasta el extremo que son consideradas muy superiores, incluso a las de Si cristalino, en un balance global de la transformación de energía radiante en eléctrica¹⁷⁹. Una medida del interés despertado lo constituye la abundantísima bibliografía que aparece en las revistas especializadas, aspecto éste bien demostrado por el esfuerzo que desde 1981 viene realizando el Electrical Power Research Institute (Palo Alto. Ca. -USA-) con un intento de recoger anualmente la totalidad de los trabajos sobre a-Si publicados en el año precedente, poniendo así al día la primera recolección anterior a 1981. En la puesta al día correspondiente al año 1985 se reseñan más de 600 títulos publicados durante 1984¹⁸⁰.

Las investigaciones actuales sobre materiales amorfos, en este campo de aplicación, están orientadas a mejorar el rendimiento de los dispositivos construidos con los materiales y estructuras actuales; a sintetizar nuevos productos amorfos (a-SiSn: H, a-SiC: H, etc.) y al estudio de nuevas estructuras¹⁸¹.

Células M-I-S. (Metal Insulator Semiconductor). Se ha probado experimentalmente^{182, 183} y teóricamente¹⁸⁴ que cuando en una célula del tipo de barrera Shottky se intercala un aislante entre el metal y el semiconductor se mejoran notablemente las características fotovoltaicas de la célula. Las mejoras conseguidas dependen significativamente, además, de los estados interfaciales generados y del espesor de la película de material dieléctrico intercalada, por lo que resulta muy conveniente reali-

zar, previamente a la fabricación de la célula, una optimización de dicho espesor para cada material, mediante la resolución numérica de las ecuaciones a que conduce la aplicación de un modelo adecuado para representar el comportamiento de la célula¹⁸⁵.

Este mejor comportamiento de las células solares MIS respecto de las correspondientes de barrera Shottky se atribuye a la supresión de la corriente de portadores mayoritarios por recombinación que se produce en la interfase en ausencia de la capa dieléctrica. Si el espesor de esta capa es suficientemente pequeña (inferior a unos 15 Å), la corriente de minoritarios se realiza por efecto túnel, estando ésta limitada por la generación de dichos portadores en el semiconductor sin venir afectada por la presencia de la capa túnel interfacial; en estas condiciones cuanto mayor sea la anchura de la capa de dieléctrico mayor serán tanto el voltaje en circuito abierto como el rendimiento de la célula. Sin embargo, cuando el espesor de la capa dieléctrica es suficientemente alto (superior aproximadamente a 20 Å) el transporte por efecto túnel es menos probable y es éste efecto el que regula la corriente de minoritarios y, por lo tanto, la corriente en corto-circuito y el factor de llenado de la célula (y consecuentemente la eficacia de la misma) disminuyen al aumentar la anchura de la capa túnel o, lo que es lo mismo, la anchura de la capa dieléctrica interfacial. Es evidente que ha de existir un espesor, comprendido entre estos dos valores extremos, para el cual el comportamiento de la célula es óptimo.

Desde los comienzos de utilización de este tipo de células se han llevado a cabo estudios teóricos de diferentes aspectos de las mismas, entre los que cabe destacar, el control del transporte de portadores por el almacenamiento de cargas en la capa interfacial¹⁸⁶ y la influencia en los fenómenos de recombinación¹⁸⁷ y corriente túnel¹⁸⁸ de los estados interfaciales. Recientemente se ha indicado la posible influencia en el comportamiento de la célula de la inversión de carga, en la interfase aislador semiconductor, inducida ópticamente para espesores intermedios de la capa dieléctrica¹⁸⁹; estos efectos así como su dependencia con el factor de concentración óptica incidente sobre la célula, han sido posteriormente estudiados con detalle¹⁹⁰.

Con la misma finalidad de minimizar los efectos de recombinación de portadores en la cara frontal de una célula, se intercala en la interfase

Metal-Semiconductor de una célula de unión n/p de silicio una fina capa aislante, dando lugar a las estructuras denominadas MINP (Metal-Insulator-uni3n NP)¹⁹¹. Utilizando este concepto se han construido c3lulas que presentan rendimientos del orden del 19%¹⁹², resultado que hace que este tipo de c3lulas sean consideradas entre las de prometedor futuro en las denominadas de alto rendimiento (> 20%)¹⁹³. En esta estructura el semiconductor (tipo-n) en contacto con la delgada capa de aislador, contiene una peque1a concentraci3n de minoritarios que hace despreciable el proceso de recombinaci3n y la producci3n de corriente se realiza mediante el transporte, por efecto t3nel, de los mayoritarios hacia el electrodo met1lico consistente, normalmente, en un dep3sito de Mg sobre n⁺Si con una capa intermedia de 3xido de silicio.

* * *

En lo que antecede hemos tratado de exponer muy sucintamente y de forma necesariamente incompleta por mor del tiempo disponible, los estudios m1s significativos realizados durante los 3ltimos a1os en los tipos de c3lulas fotovoltaicas que por hoy se perfilan como de posible uso en el futuro. Los logros obtenidos en esta investigaci3n b1sica son de inter3s no s3lo por los avances conseguidos en una mejor comprensi3n del fen3meno fotovoltaico en s3 mismo, sino tambi3n por su contribuci3n a la teor3a del estado s3lido y en particular de los materiales semiconductores y sus t3cnicas de fabricaci3n; materiales estos de gran utilidad en otras ramas tales como la microelectr3nica y la optoelectr3nica.

Para terminar, vamos a exponer a continuaci3n, de forma muy resumida, algunas de los aspectos que caracterizan a la producci3n de energ3a fotovoltaica y a hacer algunas consideraciones en torno al desarrollo y aplicaciones de este tipo de generadores de energ3a as3 como su incidencia en los aspectos culturales y socio-econ3micos en los pueblos que est1n lejos de alcanzar el nivel medio de calidad de vida existente en el mundo.

Como hemos dicho ya anteriormente el inter3s por el desarrollo de las c3lulas fotovoltaicas (al igual que otras formas alternativas) surge en los a1os 70, en parte como consecuencia de los problemas de tipo econ3mico que podr3an desprenderse de la actitud de los pa3ses productores de petroleo; pero m1s fundamentalmente por la crisis energ3tica que podr3a

presentarse dentro de un plazo cuya duración es muy difícil de precisar, por el previsible agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles convencionales y las reservas de uranio susceptible de ser enriquecido para su utilización en centrales nucleares de fisión.

En la búsqueda de nuevas fuentes energéticas además de la nuclear de fusión, cuya tecnología no se ha venido desarrollando al ritmo que en un principio era de esperar, se dio una especial atención a las que presentaban un corto período de renovación y que, por tanto, pueden considerarse como inagotables. Entre ellas no podían faltar las que tienen como base la energía radiante del Sol, de renovación continua y que llega a nuestro planeta en cantidades suficientes para poder suplir, con una pequeña parte de la misma, la necesidad global de energía en el mundo. Por otra parte, la posibilidad futura de realizar el aprovechamiento en el espacio exterior a la Tierra, podría evitar el posible desequilibrio ecológico a que podría conducir el cubrir una fracción excesiva de superficie terrestre por las estaciones de energía solar.

La energía fotovoltaica ocupa un lugar preferente entre las de origen solar por realizarse directamente la transformación en energía eléctrica, que constituye la forma más conveniente para el aprovechamiento, salvo en algunas aplicaciones, tal como la de calentamiento, por ejemplo, en que la transformación de energía solar a térmica sería más recomendable.

Los comités "ad hoc" designados por los organismos responsables de impulsar las investigaciones en el campo de las nuevas formas de aprovechamiento energético en los diferentes países, establecieron las metas a alcanzar y los programas a corto, medio y largo plazo de los aspectos que serían considerados como prioritarios en las subvenciones estatales para alcanzar estos objetivos. Para las células fotovoltaicas estas metas han venido siendo, fundamentalmente dos: conseguir en la transformación el más alto rendimiento posible y abaratar el producto final para hacerlo económicamente rentable.

Estas directrices y, como consecuencia, los esfuerzos de investigación y desarrollo realizados en los últimos años se han desviado del problema inicialmente planteado, pues no se ha considerado en los mismos, de forma explícita, el aspecto que debería ser prioritario: hacer máximo el balance energético del proceso global de fabricación de la

célula. Es evidente que la solución de una auténtica crisis energética implica la consecución de nuevas cantidades de energía; siendo secundario –aunque importante– el precio que se ha de pagar por ello.

El abaratamiento energético (independientemente de que también suponga un abaratamiento económico) de una célula fotovoltaica hay que buscarlo principalmente en el proceso de fabricación del material básico y en el alargamiento del tiempo de vida medio de la célula. El mayor coste energético en la preparación de láminas delgadas de materiales de uso fotovoltaico radica en la purificación, dopado y crecimiento de la lámina, que, en la mayor parte de los métodos en uso exige la operación en vacíos elevados, circunstancia que, por otra parte, limita grandemente el tamaño de la célula. Por ejemplo, una de las mejores técnicas de producción de películas cristalinas de semiconductores es la de crecimiento epitaxial por haz molecular (MBE), con la que se puede conseguir un control preciso de la estequiometría y del espesor de cada capa durante el crecimiento; pero la exigencia de tener que mantener el recinto de procesamiento a niveles de ultra-alto-vacío hace impensable que pueda ser utilizada para la fabricación de células fotovoltaicas por el consumo energético que implica el mantener estas bajísimas presiones. Desde el punto de vista económico, el precio, además, viene incrementado por los altos costes iniciales del dispositivo necesario.

Esto ha hecho que haya sido considerado la posibilidad de utilizar el espacio exterior para obtener mejoras en el balance energético y, si se utiliza para sistemas de gran capacidad, también mejoras económicas. En dos direcciones puede ser utilizando el espacio exterior: una como emplazamiento de los sistemas fotogeneradores; y otra situando en él las técnicas para la fabricación de las células, por ejemplo, mediante la construcción de gigantescos aparatos de crecimiento epitaxial por haz molecular (MBE), aprovechando el alto grado de vacío de dicho emplazamiento¹⁹⁴. Ello permitirá, por un lado, un mínimo gasto energético en el proceso de producción y, por otro, la obtención de células de tamaño varios órdenes de magnitud superiores a las actuales. Si la producción de células se realiza a gran escala, podría llegar a ser compensado el enorme gasto inicial de instalación.

Los logros obtenidos en los últimos años por los diferentes programas de I & D, algunos de los cuales planificados a medio plazo concluyen en el año actual, son, desde el punto de vista económico – único

que se ha considerado en los programas de desarrollo— bastante optimistas, hasta el punto de que, aparte de los esfuerzos estatales, ya varias industrias invierten en este tipo de investigaciones con esperanzas de encontrar pronto rentabilidad a estas inversiones. Son ya bastante numerosas las instalaciones existentes, fundamentalmente de potencia media, dedicadas a la producción fotovoltaica de energía para diversos usos.

De todas las aplicaciones prácticas que se han desarrollado merecen destacarse aquellas que tratan de atender las necesidades más primarias a poblaciones que por su bajo nivel de desarrollo económicos y dispersión geográfica están muy lejos todavía de poder tener abastecimientos energéticos por redes de distribución eléctrica convencionales. Para estos casos, la generación fotovoltaica presenta ventajas sobre otros procedimientos, por el bajo coste de mantenimiento, ya que no intervienen partes móviles en la instalación, y por su facilidad de manejo, que evita entrenamientos del personal operador.

En esta dirección se han llevado a cabo diferentes instalaciones experimentales para usos específicos, que, al menos en principio, parecen muy alentadores: para alumbrado, bombeo de agua y su potabilidad en algunos casos, regadíos, sistemas de comunicación telefónica, radio y TV —esta última para la difusión de programas educativos—, energía para pequeñas instalaciones sanitarias, etc.

Estas aplicaciones pueden tener una incidencia muy grande en el desarrollo de estos pueblos, ya que podrían evolucionar en sus propios asentamientos, evitando con ello la emigración hacia las grandes urbes con la correspondiente pérdida de su propia idiosincrasia y costumbres y en muchos casos la discriminación étnica que el desplazamiento puede llevar consigo.

De la magnitud del problema desde el punto de vista industrial podemos darnos cuenta con sólo recordar que entre 1/3 y 1/4 de la población mundial vive diseminada en pequeños poblados carentes de electricidad y con recursos agrícolas muy poco desarrollados por la falta regular de lluvias y/o aguas superficiales. Por otra parte la adecuación de la energía fotovoltaica está asegurada, ya que la mayor parte de esta población se encuentra en áreas geográficas de alto grado de insolación.

Es verdad que otras aplicaciones pueden, desde el punto de vista de aprovechamiento, tanto energético como económico, considerarse más racionales, como por ejemplo, el uso de generadores fotovoltaicos de alta potencia (del orden de uno o más megavatios) conectados a una red de suministro de electricidad, a través de la cual se puede evitar el uso de un sistema de almacenamiento energético, si la aplicación exige un consumo continuado de electricidad. Pero, sin duda, es la dedicada a tratar de elevar el nivel cultural y social de los pueblos más atrasados la que puede producir mayores beneficios, aunque estos no se midan ni en kilowatios-hora ni en dólares.

* * *

BIBLIOGRAFIA

- ¹ BECQUEREL, E; *Compt. Rend.*, **9**, 145 (1839).
- ² BECQUEREL, E.; *Compt. Rend.*, **9**, 561 (1839).
- ³ ADAMS, W. G. y R. E. DAY; *Proc. Roy. Soc. London*, **A25**, 113 (1877).
- ⁴ SMITH, W.; *Nature*, **7**, 303 (1873).
- ⁵ HODGE, P., *Phys. Rev.*, **26**, 540 (1908).
- ⁶ HODGE, P.; *Phys. Rev.*, **28**, 25 (1909).
- ⁷ JENKINS, R. Y.; *Phys. Rev.*, **18**, 402 (1921).
- ⁸ SCHOTTKY, W.; *Zeit. Phys.*, **31**, 913 (1930).
- ⁹ GRONDAHL, L. O.; *Rev. Mod. Phys.*, **5**, 141 (1933).
- ¹⁰ RAPPAPORT, P.; *Phys Rev.*, **93**, 246 (1954).
- ¹¹ RAPPAPORT, P., J. J. Loferski y E. G. LINDER; *RCA Rev.*, **17**, 100 (1956).
- ¹² CHAPIN, D. M., C. S. FULLER y G. L. PEARSON; *J. Appl. Phys.*, **25**, 676 (1954).
- ¹³ REYNOLS, D. C. y G. M. LEISS; *Electr. Eng.*, **73**, 734 (1954). REINOLS, D. C., G. LEIES, L. L. ANTES y R. E. MARBURGER; *Phys Rev.*, **96**, 533 (1954).
- ¹⁴ THEKAEKARA, M. P.; "Data on incident solar energy, the energy crisis y energy from the sun"; Inst. of Environmental Sciences. N. Y. (1974)
- ¹⁵ FAHRENBRUCH, A. L. y R. H. BUBE; "Fundamentals of Solar Cells. Photovoltaic Solar Energy Conversion"; Acadmic Press. N. Y. (1983).
- ¹⁶ LAUDISE, R; "The Growth of Single Crystals"; Prentice Hall Inc. (1980).

- 17 RODES, R. G.; *"Imperfections and Active Centers in Semiconductors"*. Mac. Millan. N. Y. (1964).
- 18 PEARSON, G. L. y C. S. FULLER; *Proc. Inst. Rad. Engrs.*, **42**, 760 (1954).
- 19 La célula de mayor rendimiento (1%) era de tipo termoeléctrico. TELKES, M.; *J. Appl. Phys.*, **18**, 1116 (1947).
- 20 PRINCE, M. B.; *"Silicon Solar Energy Converters"*; *J. Appl. Phys.* **26**, 534 (1955).
- 21 HOVEL, H.; *Semiconductors and Semimetals Vol II; "Solar Cells"*; New York: Academic; (1975).
- 22 WOLF, M; *IEEE Trans. Electron. Devices*; ED-27, 465-72 (1980).
- 23 PRYER, R. A.; *Proc. 14th Photovoltaic Specialists' Conf.*, p. 815 (1980).
- 24 DAVIS, J. L. Jr, A. ROHATGI, R. H. HOPKINS, P. D. BLAIS, P. RAICHOUDHURY, J. R. McCORMICK y H. C. MOLLENKOFF; *IEEE Trans. Electron Dev.*, **27**, 677 (1980).
- 25 LUTWACK, R.; *Proc. 3rd EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*; p. 220 (1980).
- 26 SCHWUTTKER, G. H.; *Proc. 2th EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*; pp. 123 y 130 (1979).
- 27 FIEGL, G.: *Proc. 3rd EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*; p. 209 (1980).
HOPKINS, R. H.; *Proc. Symp. on Materials and New Processing Technologies for photovoltaics* (New York: Electrochemical Soc.), vol **81-3**, (1981).
- 28 SCHMID, F., M. BASARN y C. P. KHATTAK; *Proc. 3rd EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*; p. 252, (1981).
- 29 CISZEK, T. F.; *Mater. Res. Bull.*, **7**, 731 (1972).
- 30 RAVI, K. V., H. B. SERREZE, H. E. BATES, A. D. MORRISON, D. N. JEWETT y J. C. T. HO; *Proc. 11th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, p. 280 (1975).
- 31 HORD, J. L. y T. F. CISZEK; *Crystal Growth*, **59**, 499 (1984).
- 32 MLAVSKY, A. I., H. B. SERREZE, R. W. STORMONT y A. S. TAYLOR; *Proc. 12th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, p. 160 (1976).
- 33 TSU, Y. S., J. L. HURD, R. J. AHTSON y T. F. CISZEK; *IEEE Trans. Electron Dev.*, **31**, 614 (1984).
- 34 O'HARA, S. y A. I. BENNETT; *J. Cristal Growth*, **39**, 17 (1977).
- 35 SEIDENSTICKER, R. G.; *J. Cristal Growth*, **39**, 17 (1977).
- 36 DUNCAN, C. S., R. G. SEIDENSTICKER, J. P. McHUGH, R. M. HOPKINS, M. E. SKUTCH, J. M. DRIGGERS Y F. E. HILL; *Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, p. 25 (1980).
- 37 SEIDENSTICKER, R. G., L. SCUDDER y H. W. GRANDHORST; *Proc. 11 th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, p. 358 (1978).

- 38 GURTLER, R. W., A. BAGHADI, R. N. LEGGE y R. J. ELLIS; *Proc. 2nd EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*, p. 145 (1979).
- 39 SCJWITTLE. G. H.; *Proc. 2nd EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*, p. 130 (1979).
- 40 CISZEK, T.; *Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, (1982).
- 41 WOLF, M.; *Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*; 674 (1980).
- 42 SPITZER, M. B., J. SHEWCHUN y J. LOFERSKI; "*Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*", p. 375 (1980).
- 43 SOUTZER, M. B., J. SHEWCHUN, E. S. VERA y J. J. LOFERSKI; *Proc. 14th Photovoltaic Specialists' Conf.*, p. 375 (1980).
- 44 SPITZER, M. B., S. P. TOBIN y C. J. KEARNEY; *IEEE Trans. Electron Dev.*; **31**, 546 (1984).
- 45 GREEN, M. A., A. W. CLAKERS, J. SHI, E. M. KELLER y S. R. WENDHAM; *IEEE Trans. Electron Dev.*; **31**, 679 (1984).
- 46 GREEN, M. A. et al.; *Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, (1984).
- 47 BENTINI, G. G., R. CALLONI, C. SUMMONTE, Q. ZINI y F. ZIGNANI; *Proc. 6th EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*, p. 990 (1985).
- 48 ROHATGI, A. y P. RAI-CHOUDUHURY; *IEEE Trans. Electron Devices*; **31**, 596 (1984).
- 49 SIGMUND, H.; *Proc. 6th EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*, p. 118 (1985).
- 50 ROHATGI, A. y P. RAI-CHOUDUDHURY; *IEEE Trans. Electron Dev*; **33**; 1 (1986).
- 51 ROHATGI, A. (Editor); "*Special issue on High Conversion Efficiency in Single-Crystal Si Solar Cells*"; *Solar Cells*, **17**, 1-166 (1986).
- 52 SAH, C. T.; *Solar Cells*, **17**, 1 (1986).
- 53 SPITZER, M. B., C. J. KEAVNEY y L. M. GEOFFROY; *Solar Cells*, **17**, 135 (1986).
- 54 ROTHWARF, A.; *Proc. 2nd IEEE Photovoltaic Especialists Conf*, p. 488 (1976).
- 55 JURUZIK, J. y L. ZDANOWICK; *Thin Solid Films*, **67**, 285 (1980).
- 56 THORNTON, J. A.; *J. Vac. Sci. Technol.* **11**, 666 (1974).
- 57 FEDMAN, F. G., F. G. SATKIEWICZ y N. a. BLUM; *Thin Solid Films*, **90**, 461 (1982).
- 58 LOPEZ-OTERO, A.; *J. Cryst. Growth*, **42**, 157 (1977).
- 59 LOEPEZ-OTERO, A.; *Thin Solid Films*; **49**, 3 (1978).
- 60 ROMEO; *J. Crystal Growth*, **52**, 692 (1981).
- 61 RASMAIS, E.; *Semicond. Prod. Solid. State Technol.*, Junio, p. 30 (1963).
- 62 FAHARENBRUCH, A. L. y R. H. BUBE. (1983); ref. [15], pg. 857.

- 63 REYNOLDS, D. C. y S. J. CZYZAK; *Phys. Rev.*, **96**, 1705 (1954).
- 64 BUHKS, E.; *Solar Energy Materials*, **13**, 213 (1986).
- 65 VELDE, T. TE; *Energy Conversion*; **15**, 111 (1975).
- 66 BURJELMAN, M. y A. DE VOS; *Thin Solid Films*, **102**, 367 (1983).
- 67 BURJELMAN, M., A. DE VOS y L. VANDENDRIESCHE; *Proc. 5th EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*, p. 873 (1983).
- 68 MARTIL, I., G. GONZALEZ-DIAZ, F. SANCHEZ-QUESADA y M. RODRIGUEZ VIDAL; *Thin solid Films*, **90**, 253 (1982).
- 69 ELIZALDE, E., M. LEON, F. RUEDA y F. ARJONA; *Proc. 4th EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*, p. 809 (1982).
- 70 GONZALEZ-DIAZ, G., I. MARTIL, F. SANCHEZ-QUESADA, M. RODRIGUEZ-VIDAL, A. GRAS-MARTI y J. A. VALLES-ABARSCA; *J. Vac. Sci. Technol.*, **A1**, 1394 (1983).
- 71 MARTIL, I., G. GONZALEZ-DIAZ y F. SANCHEZ-QUESADA; *Solar Energy Materials*, **12**, 345 (1985).
- 72 WILLIAMS, R. y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.*, **31**, 968 (1960).
- 73 FABRICUR, E. S.; *J. Appl. Phys.*, **33**, 1597 (1962).
- 74 BRIMMEISS, H. G. y R. MEMMING; *J. Appl. Phys.*, **33**, 2217 (1962).
- 75 CUSANO, D. A.; *Solid. State Electron.*, **6**, 217 (1963).
- 76 KEATING, P. N.; *J. Phys. Chem.*, **24**, 1101 (1963).
- 77 HILL, T. S. y B. G. KERMIDAS; *IEEE Trans. Electron. Devices*, **ED-14**, 22 (1967).
- 78 SELLE, B., W. LUDWING y R. MACH; *Phys. Status Solidi*, **24**, K145 (1967).
- 79 EGORA, I. V.; *Sov. Phys. Semicond.*, **2**, 266 (1968).
- 80 MYTTON, R. J.; *Br. J. Appl. Phys.*, **1**, 721 (1968).
- 81 ROTHWARF, A.; *Proc. 2nd EC Photovoltaic Solar Energy Conf. pg. 370.* (1979).
- 82 FARENBRUCH, A. L. y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.*, **45**, 1264 (1974).
- 83 ROTHWARF, A. y H. WINDAWI; *Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, p. 722 (1982).
- 84 EGGLESTON, A. W. y C. J. MOSES; *Solar Cells*, **14**, 1 (1985).
- 85 LOFERSKI, J. J.; *Proc. IEEE*, **51**, 667 (1963).
 MICHELL, K. W., A. L. FAHRENBRUCH y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.*, **48**, 4365 (1977).
 MICHELL, K. W., "Evaluation of the CdS/CdTe Hetero-junction Solar Cell". New York; Garland (1979).

- 86 MICHELL, K. W, A. L. FAHRENBRUCH y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.*, **48**, 829 (1977).
- 87 BUBE, R. H.; *Proc. Symp. on Materials and New Proc. Technol. for Photovoltaics*". Pennington, N. J. (1983). BUBE, R. H. *et al.*; *IEEE Trans. on Electron Dev.*; **31**, 528 (1984).
- 88 BUBE, R. H., A. L. FAHRENBRUCH, R. SINCLAIR, T. C. ANTHONY, C. FORTMANN, W. HUBER, C. T. LEE, T. THORPE y T. YAMASHITA; *Trans. Electron Dev.*, **31**, 528 (1984).
- 89 BARBEE, M., F. BAILLY, D. LINCOLN y G. COHEN-SOLAL; *Proc. 16th IEEE, Photovoltaic Conf.* p. 1133 (1982).
- 90 MIMILA-ARROYO, J. Y. MARFAING, G. COHEN-SOLAL y R. TRIBOULET; *Solar Energy Mater.*, **1**, 171 (1979).
- 91 ARANOVICH, J. A., D. GOLBAYO, A. L. FAHRENBRUCH y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.*; **51**, 4260 (1980).
- 92 COURREGES, F. G., A. L. FAHRENBRUCH y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.* **51**, 2175 (1980).
- 93 WERTHEN, J. G., A. L. FAHRENBRUCH y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.*; **54**, 2750 (1983).
- 94 YIN. S. Y., A. L. FAHRENBRUCH y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.*; **49**, 1294 (1978).
- 95 MITCHELL, F. W., A. L. FAHRENBRUCH y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.*; **48**, 829 (1977).
- 96 CHRODER, D. K. y D. L. MEIER; *IEEE Trans. Electron Dep.*; **31**, 637 (1984).
- 97 YAMAGUCHI, K., N. NAKAYAMA, H. MATSUMOTO y S. IKENAGI; *Jap. J. Appl. Phys.*; **16**, 1203 (1977).
- 98 MA, Y. Y., A. L. FAHRENBRUCH y R. H. BUBE; *Appl. Phys. Lett.*; **30**, 423 (1977).
- 99 UDA, H., H. TANIGUCHI, M. YOSHIDA y T. YAMASHITA; *Jap. J. Appl. Phys.*; **17**, 585 (1978).
- 100 BASOL, B. M., E. S. TSENG, R. L. ROD, S. ON y O. M. SSTAFAUDD. *Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialist' Conf.* (1982).
- 101 NAKAYAMA, N., H. MATSUMOTO, A. NAKANO, S. IKEGAMI, H. UDA y T. YAMASHITA; *Jap. J. Appl. Phys.*; **19**, 703 (1980).
- 102 UDA, H., H. MATSUMOTO, Y. KOMATSU, A. NAKANO y S. IKEGAMI; *Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialist' Conf.* (1982).
- 103 MATSUMOTO, H., K. KURIBAYASHI, Y. KOMATSU, A. NAKANO, H. UDA y S. IKEGAMI; *Solar Cells*; **11**, 367 (1984).
- 104 NICOLL, F. H.; *J. Electrochem. Soc.*; **110**, 1165 (1963). Una descripción detallada

- puede verse en: T. C. ANTONY, A. L. FAHRENBRUC y R. H. BUBE; *J. Vac Sci Technol.*; **A2**, 1296 (1984).
- 105 TYAN, Y-5 y E. A. PEREZ-ALBUERNE; *Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.* (1982).
- 106 ANTONY, T. C., A. L. FAHRENBRUCH, M. G. PETERS y R. H. BUBE; *J. Appl. Phys.*; **57**, 400 (1984).
- 107 CUSANO, D. A.; *Solid-State Electron.*; **6**, 217 (1963).
- 108 JUSTI, E. ;, G. SCHNEIDER y J. SEREDYNSKI; *Energy Conversion*; **13**, 53 (1973).
- 109 PONPON, J. P. y P. SIFFERT; *Rev. Phys. Appl.*; **12**, 427 (1977).
- 110 BASOL, B. M., O. M. Stafsudd y A. BINDAL; *Solar Cells*, **15**, 279 (1985).
- 111 SCHRODER, D. K., y D. L. MEIER; *IEEE Trans. Electron Dev.*; **31**, 637 (1984). Véase también WERTHEN, J. G. et al. (1983) ref. [93].
- 112 ANTONY, T. C. et. al. (1984) ref. [106].
- 113 CHEN, W. S. y R. A. MICKELSEN; *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **62**, 248 (1981).
- 114 COUTTS, T., L. KAZMERSKI y S. WAGNER Editores; *Solar Cells*; vol. 16; pp. 1-640, (1986). vol., dedicado íntegramente al CuInSe_2 y su aplicación a células solares, más de 40 trabajos dedicados a producción, caracterización y dispositivos.
- 115 PALATNIK, L. S. y E. I. ROGACHEVA; *Soviet Phys. Dokl.*, **12**, 503, (1967).
- 116 BECKER, K. D. y S. WAGNER; *Phys. Rev.* **827**, 5240 (1983).
- 117 BACHMANN, K. J. et. al; *Appl. Phys. Lett.* **44**, 407 (1984).
- 118 BACHMANN, K. L. *loc. cit.* PARKES, J. et. al. *J. of Crystal Growth*, **20**, 315 (1973).
- 119 DHERE, N. G., M. C. LOURENCO, R. G. DHERE y L. L. KAZNERSKI; *Solar Cells*, **13**, 59 (1984).
- 120 GOSLOWSKY, H., S. FIECHTER, R. KONENKAMP y H. J. LEWERENZ; *Solar Energy Materials*, **13**, 221 (1986).
- 121 PADAM, G. K. y S. U. M. RAO; *Solar Energy Materials*, **13**, 297 (1986).
- 122 CISCEK, T. F., J. L. HURD y T. SCHUYLER; *Solar Energy Research Institute (SERI)*. 1984 Annual Report Solar St. Photov. Research Branch pag. 6, (1985).
- 123 RABENAU, A. y H. RAU; *Philips Tech. Rev.*, **30**, 89 (1969).
- 124 HOVEL, H. J.; "SEMICONDUCTORS AND SEMIMETALS. Vol II (Solar Cells)"; pp. 74-75 (1975).
- 125 GOBAT, A. R., M. F. LAMORTE y G. W. McIVER; *IRE Trans. Mil. Electro.*; **6**, 20 (1962).
- 126 FAN, J. C. C., G. W. TURNER, R. P. FALE y C. O. BOZLER; *Proc. 14th Photovoltaic Specialists' Conf.*; p. 1950 (1980).

- 127 BORREGO, J. M., R. P. KEENEY, J. B. BHAT, L. G. SUNDARAN y S. K. GHANDI; *Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialist' Conf.*; p. 1157 (1982).
- 128 FAN, J. C. C., C. O. BOZLER y R. W. McCLELLAND; *Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialist' Conf.*; p. 666 (1981).
- 129 ALFEROV, S. I., U. M. ANDREEV, M. B. KAGAN, I. I. PROTASOV y V. G. TROFIM; *Sov. Phys. Semicond.*; 4, 2047 (1971).
- 130 BHAT, I., K. N. MATHUR, J. M. BORREGO y S. K. GHANDI; *Solid State Electron.*; 27, 2, 121 (1984).
- 131 GHANDI, S. K., G. MATHUR, H. RODE y J. M. BORREGO; *Solid State Electro.*; 27, 1149 (1984).
- 132 KAMATH, G. S.; *IEEE Trans. Electron Devices*; 24, 473 (1977).
- 133 KNECHTLI, r. C., R. Y. LOO y F. S. KAMATH; *IEEE Trans. Electron Devices*; 31, 577 (1984).
- 134 MILES, A. G. y D. L. FEUCHT; "Heterojunctions and Metal Semiconductor Junctions": Acad. Pres, New York (1972).
- 135 BLANCONNIER, P., M. CERLEET, P. HENOS y A. M. JEAN LOVIS; *Thin Solid Films*, 55, 373 (1978).
- 136 ZHUK, B. V., I. A. ZHUKOV y A. a. ZLENKO *Solid State Electronics*; 29, 247 (1986).
- 137 ZOLPER, J. C. y A. M. BARNETT; *Proc. 6th EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*, p. 165 (1985).
- 138 TURNER, G. W., J. C. C. FAN, R. P. GALE y O HURTADO; *Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, (1980).
- 139 FARHENBRUCH, A. L. y R. H. BUBE; *Loc. cit.* [], p. 311-323.
- 140 SCHUELKE, R. J., C. M. MAZIAR y M. S. LUNDSTROM; *Solar Cells*; 15, 73 (1985).
- 141 HANG, R. T., S. K. CHANDHI y J. M. BORREGO; *Solar Energy Materials*; 13, 469 (1986).
- 142 LUDOWISE, M. J. y W. T. DIETZE; *J. Appl. Phys.*, 55, 4318 (1984).
- 143 NELL, M. y A. M. BARNETT; *Proc. 6th EC Photovoltaic Energy Conf.*, p. 265 (1985).
- 144 COUTS, T. J. y N. M. PEARSALL; *Proc of IEE Meeting on Plasma Deposition Process*, London (1982).
- 145 COUTS, T. J. y S. NASSEM; *Appl. Phys. Let.*, 46, 164 (1985).
- 146 COUTS, T. J., S. NASSEM y R. J. AHRENKIEL; *Proc. 6th EC Photovoltaic Solar Energy Conf.*, p. 174 (1985).
- 147 CHEEK, G. C., R. P. VAN OVERSTRAETEN y L. FRISSON; *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 31, 602 (1984).

- 148 FIROR, K. y S. HOGAN; *Solar Cells*, 5, p. 87 (1982).
- 149 DUBEY, G. C.; *Solar Cells*, 15, p1 (1985).
- 150 NAKAYAMA, H. N., H. MATSUMOTO, A. NAKANO, S. IKEGAMI y T. YAMASHITA; *J. Appl. Phys.*, 19, 703 (1980).
- 151 UDA, H., H. MAATSUMOTO, Y. KOMATSU y S. IKEGAMI; *Proc. 16th IEEE Photo-voltaic Specialists' Conf.*, 801 (1982).
- 152 MATSUMOTO, H., K. KURIBAYASHI, A. NAKANO y S. IKEGAMI; *Sollar Cells*, 11, 367 (1984).
- 153 UDA, H., A. NAKANO, K. KURIBAYASHI, Y. KOMATSU, H. MATSUMOTO y S. IKEGAMI; *J. Appl. Phys.*, 22, 1822 (1983).
- 154 SAVELLI, M., J. BOUGNOT, H. LUQUET, M. PEROTIN, O. MARIS y C. GRIL; *Solar Cells*, 5, 213 (1982).
- 155 ANDERSON, W. W. y Y. G. CHAI; *Energy Conv.*, 15, 85 (1976).
- 156 KALYANASUNDARAM, K.; *Solar Cells*, 15, 93 (1985).
- 157 KALYANASUNDARAM, K.; *Solar Cells*, 15, 93 (1985).
- 158 WALDROP, J. R., M. J. COHEN, A. J. HEEGER y A. G. MacDIARMID; *Appl. Phys. Lett.*, 38, 53 (1981).
- 159 SCRANTGON, R. A., J. B. MOONEY, J. O. McCADIN, T. C. MCGILL y C. A. HEAD; *Appl. Phys. Lett.*, 29, 47 (1976).
- 160 BEST, J. S., J. O. McCALDIN, T. C. MCGILL, C. A. MEAD y J. B. MOONEY; *Appl. Phys. Lett.*, 29, 433 (1976).
- 161 SPEAR, W. E. y P. G. LECOMBER; *Solid State Communications*; 17, 1193 (1975).
- 162 CARLSON, D. E. y C. R. WRONSKI; *Appl. Phys. Lett.*; 28, 671 (1976).
- 163 SPEAR, W. E., P. G. LECOMBER, S. KINMOND y M. G. PRODSKY; *Appl. Phys. Lett.*; 28, 105 (1976).
- 164 WILSON, J. I. B.; *Solid St. Electron Dev.*; 2, 57 (1978).
- 165 Solar Energy Research Institute (SERI); *"Basic Photo voltaic Principles and Methods"*, Cap. 7. Van Nostran Reinchald Company, N. Y. (1984).
- 166 ANDERSON, D. A. y W. E. SEAR; *Phil. Mag.*; 35, 1 (1977).
- 167 HAMAKAWA, Y.; *Solar Energy Materials*; 8, 101 (1982).
- 168 TAWADA? Y. M. KINDO, H. OKAMOTO y Y. HAMAKAWA; *Solar Energy Materials*; 8, 299 (1982).
- 169 LIM, K. S., M. KONAGAI y K. TAKAHASHI; *J. Appl. Phys.*; 56, 538 (1984).
- 170 RUBINLLI, F., S. ALBORNOZ y R. BUITRAGO; *Solid State Electronics*; 28, 741 (1985).

- 171 SCHADE, H. y Z. E. SMITH; *J. Appl. Phys.*; **57**, 568 (1985).
- 172 CARLSON, D. D.; *IEEE Trans. Electron Dev.*; **24**, 449 (1977).
- 173 CARLSON, D. E.; *Solar Energy Materials*; **3**, 503 (1980).
- 174 MCGILL, J., J. I. B. WILSON y S. KINMOND; *J. Appl. Phys.*; **50**, 540 (1979).
- 175 HACK, M. y M. S. SHUR; *J. Appl. Phys.*; **55**, 4413 (1984).
- 176 GRANDALL, R. S.; *J. Appl. Phys.*; **55**, 4418 (1984).
- 177 DEMICHELIS, f., A. TAGLIAFERRO y E. TRESSO; *Solar Cells*; **14**, 149 (1985).
- 178 OKUDA, K., H. OKAMOTO y Y. HAMAKAWA; *Jap. J. Appl. Phys.*; **22**, L605 (1983).
- 179 RIDDOCH, F. y J. I. B.; *Solar Cells*; **2**, 141 (1980).
- 180 CROWLEY, J. L., edit.; *Solar Cells*, vol. 14, pp 301-369, (1985).
- 181 MADAN, A. y colaboradores; SERI; *Anual Report St. Photov. Research Branch*, pag. 60 (1984).
- 182 LILLINGTON, D. R. y W. g. TOWNSEND; *Appl. Phys. Lett.*, **28**, 97 (1976).
- 183 ABOU ELFOTOUH, F. A.; *J. Vac. Sci. Technol.*, **18**, 888 (1981).
- 184 FONASH, S. J.; *J. Appl. Phys.*; **46**, 1286 (1975).
- 185 AL MAS' ARI, M. A. S.; *Solar Cells*; **14**, 99 (1985).
- 186 FONASH, S. J.; *J. Appl. Phys.*; **47**, 3597 (1976).
- 187 SHEWCHUN, J., R. SINGH y M. a. GREEN; *J. Appl. Phys.*, **48**, 765 (1977).
- 188 VIKTOROVITH, P. y G. KARAMINOS; *J. Appl. Phys.*, **48**, 3060 (1977).
- 189 NG, K. K. y H. C. CARD; *IEEE Trans. Electron Dev.*, **27**, 716 (1980).
- 190 ABDOU, AA y S. E. D. HABB; *Solid State Electro.*, **29**, 751 (1986).
- 191 GREEN, M. a., A. W. BLAKERS, M. R. WILLISON, T. SZPITALAC, E. M. KELLER, E. GAUJA y P. J. HART; *Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialist' Conf.*, p. 1405 (1981).
- 192 GREEN, M. A., A. W. BLAKERS, Shi JIQUN, E. M. KELLER, S. R. WENHAM, R. B. GODFREY, T. SZPITALAK y M. R. WILLISON; *Proc. 17th IEEE Photovoltaic Sapecialists' Conf.*, p. 386 (1984).
- 193 OLSEN, L. C. y F. W. ADDIS; *Solar Cells*, **17**, 151 (1986).
- 194 HAMAKAYA, Y. y H. TAKAKURA; *Solar Celles*; **12**, 99 (1984).

* * *

DISCURSO DE CONTESTACION

POR EL ACADEMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. JOSÉ GARCÍA SANTESMASES

Excmo. Señor Presidente,
Excmos. Señores Académicos,
Señoras y Señores:

Ante todo deseo expresar mi agradecimiento a esta Real Academia por el honor y privilegio que me ha otorgado al designarme para dar la bienvenida a nuestro nuevo compañero profesor Maximino Rodríguez Vidal, querido amigo y antiguo colaborador mío. Será muy grato para mí destacar los grandes méritos científicos, docentes y humanos que concurren en la personalidad del recipiendario.

Mi primer contacto con Maximino Rodríguez Vidal fue en la Universidad Complutense de Madrid, hacia 1948. El recipiendario había terminado hacía poco tiempo sus estudios de las licenciaturas en Ciencias Exactas y Físicas y yo hacía pocos años que era Catedrático de Física Industrial de la misma Universidad.

Fué uno de mis primeros y mejores colaboradores, tanto en la docencia como en la investigación. De mis recuerdos de aquella época aflora con insistencia, la escasez en medios materiales para realizar los trabajos de investigación y la forma como nos ingeniábamos para superarla. Uno de los recuerdos más vivos es la necesidad de trabajar por la noche en los laboratorios debido a las restricciones de energía eléctrica durante las horas diurnas. Todo esto era aceptado con ánimo esforzado por Rodríguez Vidal y restantes colaboradores, con objeto de llevar a cabo los trabajos de investigación. Algún día habrá que tratar de esta época

y de la labor investigadora realizada, a pesar de los obstáculos que se tuvieron que salvar.

Rodríguez Vidal comenzó su labor investigadora con el Prof. Baltá, bajo cuya dirección hizo estudios experimentales sobre Piezoelectricidad en los que consiguió, utilizando nuevas técnicas de análisis para la separación de maclas, hacer oscilar por primera vez a cuarzos españoles.

Bajo el punto de vista docente, durante los cursos 1947-48 y 1949-50, fue ayudante de clases prácticas en las asignaturas de "Electricidad y Magnetismo" y "Física general". Era ayudante de esta última cuando comenzó mi contacto con Maximino Rodríguez Vidal, que se amplió al investigar conmigo sobre circuitos de conmutación.

Durante esta época pude apreciar sus aptitudes docentes e investigadoras, acompañadas de sus grandes cualidades humanas de inteligencia y capacidad de trabajo.

En 1950 estuvo pensionado por el C.S.I.C. en las Universidades de Cambridge y Manchester (Inglaterra) para el estudio del diseño de circuitos electrónicos de cálculo. Durante este período, además de familiarizarse con el uso de las máquinas Edsac y Mark de dichas Universidades, asistió a los cursos que en Cambridge impartían los Profs. D. R. Hartree sobre "Cálculo numérico" y P.A.M. Dirac sobre "Mecánica cuántica".

A su regreso de Inglaterra reemprende su labor docente en la Universidad Complutense y su labor investigadora en el Departamento de Electricidad del C.S.I.C., trabajando en la Sección de Sistemas digitales y realizando el diseño lógico de una computadora electrónica digital.

También colaboró en la investigación sobre circuitos ferromagnéticos, publicando dos trabajos que sirvieron de base a su tesis doctoral, que obtuvo la calificación de sobresaliente y Premio extraordinario.

La labor investigadora no distrajo a Rodríguez Vidal de su vocación docente a la que se dedicó con gran entusiasmo. Así, preparó oposiciones a Cátedra de Universidad, ganando brillantemente en 1955, la de Electricidad y Magnetismo de la Universidad de La Laguna (para desempeñar Física General). En este cargo permanece hasta finales del curso 1959-60. Durante este tiempo hubo de dedicarse fundamentalmente a

la asignatura en todos sus niveles, dado que anteriormente había estado la misma sin titular, por un largo período de tiempo.

A pesar de las dificultades para iniciar trabajos de investigación, por falta de laboratorios y colaboradores adecuados, lleva a cabo, en conjunción con la cátedra de Química Inorgánica, el diseño y construcción de un electroimán idóneo para medidas en magnetoquímica, así como la dirección de varios trabajos de licenciatura.

A comienzos del curso 1960-61 se incorpora a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valencia, en la que, al curso siguiente, se crea la Licenciatura en Ciencias Físicas. Este hecho implicó una gran sobrecarga docente para el Prof. Rodríguez Vidal; no obstante, siguiendo su vocación investigadora crea un pequeño grupo de trabajo con el que inicia investigaciones encaminadas al desarrollo de nuevos métodos (y modificación de los existentes) para la medida de pérdidas dieléctricas. Al mismo tiempo crea la Sección de Electrónica del Instituto "Alfonso el Magnánimo" dependiente del C.S.I.C. y de la Diputación Provincial de Valencia, ligando de esta forma a dicha Institución, las futuras investigaciones que se realizaron en la Facultad.

A principios del curso 1966-67 se incorpora a la Cátedra de Electricidad y Magnetismo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Complutense, obtenida por oposición, y también en este caso se ve recargada su labor docente por iniciarse en dicha Facultad, la nueva especialidad de Electrónica, y recaer sobre él la enseñanza de las nuevas materias que la misma incluye, sobre todo al tratar de dar a dicha especialidad una orientación más acusadamente de Electrónica Física que tenía en el proyecto original.

Continúa, al ritmo que la docencia y los escasos medios de laboratorio le permiten, las investigaciones sobre métodos de medida en dieléctricos ampliando el intervalo de frecuencias al de las microondas, así como trabajos de caracterización de dispositivos electrónicos de semiconductores.

En 1974 se le concede una Ayuda de trabajo en Equipo por la Fundación "Juan March" y casi simultáneamente otra dentro del Convenio de Cooperación España-USA, ambas relacionadas con los fenómenos de pulverización catódica (sputtering); la primera para el estudio del fenó-

meno en sí, y la segunda para su aplicación a la producción y estudio de láminas delgadas, por este procedimiento, de CdTe con miras a su utilización en la conversión directa de energía solar.

Estas ayudas le permiten consolidar la creación de un equipo de colaboradores y dotar al laboratorio con medios básicos suficientes para poder llevar a cabo, no sólo los trabajos para los que fueron concedidas las ayudas, sino también otros que posteriormente le fueron subvencionados por la CAICYT.

Todo ello ha cristalizado en la formación de un equipo de investigación, en el Departamento que dirige, con capacidad para llevar a cabo trabajos en las siguientes líneas, que en la actualidad se encuentran estrechamente relacionados, por proyecto subvencionados por la CAICYT con Departamentos de otras Universidades:

a) *Microondas (producción y estudio de dispositivos)*, en coordinación con el Departamento de Física de la Universidad de Murcia. Se mantienen relaciones, a través del British Council, con el Departamento de Electrónica de la Universidad de Surrey (Inglaterra).

b) *Láminas delgadas de semiconductores de interés fotovoltaico*. En colaboración con el Departamento de Física de la Universidad de Alicante. Se han mantenido relaciones con el Boston College, y con el Department of Materials de la Universidad de Stanford; actualmente se ha conseguido una colaboración con la Brown University de Providence (USA).

c) *Fenómenos físicos en los procesos de interacción de haces de iones con sólidos (Sputtering y Dopado)*. En colaboración con el Departamento de Física de la Universidad de Alicante. Se ha mantenido relación con el Departamento of Electrical Engineering de la Universidad de Salford (Inglaterra).

d) *Plasmas generados por ondas de superficie (intervalo de microondas)*. En colaboración con el Departamento de Física de la Universidad de Córdoba.

Como complemento a esta amplia y fecunda labor investigadora, hay que señalar sus actividades internacionales.

Así, entre las no estrictamente universitarias del Prof. Rodríguez Vidal, cabe destacar el gran impulso que ha comunicado a las actividades de la Unión Radio Científique Internacional (URSI). Desde que en 1980 fue nombrado Presidente del Comité Nacional ha organizado y celebrado con éxito dos Symposiums Nacionales, tres Reuniones de la Comisión B (Campos y Ondas) y le fue encomendado por la Comisión B Internacional la organización del “1983-URSI International Symposium on Electromagnetic Theory” (que se celebró en agosto en la Universidad de Santiago de Compostela, y que, por el acierto en la organización fue felicitado en el Bulletin de la Unión núm. 226 del mes de septiembre 1983). Este symposium, que se celebra tradicionalmente cada tres años, constituye la actividad de mayor prestigio científico de la mencionada Comisión B.

Su gran labor investigadora se halla plasmada en unos 50 trabajos publicados y 16 Tesis doctorales dirigidas. De los doctores formados por Rodríguez Vidal, seis son catedráticos de Universidad, uno, profesor numerario de la Universidad de Venezuela y otros, catedráticos de Escuelas Técnicas de Ingenieros Industriales y Profesores adjuntos de Universidad.

Rodríguez Vidal pertenece a las siguientes sociedades científicas: American Association for the advancement of Science, American Physical Society, Asociación Española de Informática y Automática, European Physical Society, Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Real Sociedad Española de Física y Química.

Es autor de algunos libros y monografías entre los que es interesante destacar:

“Electromagnetismo”, Texto de la Universidad Nacional de Educación a Distancia – Madrid 1977; “Proceedings del 1^{er}. Symposium Nacional de la URSI” (Editor principal – Madrid 1980); “Proceedings del 1983-URSI – International Symposium on Electromagnetic Theory” Presidente del Comité editor – Santiago de Compostela 1983.

Debido a sus grandes cualidades científicas y humanas se le ha llamado a ocupar cargos de responsabilidad. Así, podemos señalar que ha sido Decano de la Facultad de Ciencias de la “Universidad de Electricidad y Electrónica” del Instituto “Alfonso el Magnánimo” del C.S.I.C. y la Diputación Provincial de Valencia (1963-65). Miembro Fundador y Primer

Presidente del Grupo de "Electricidad y Magnetismo" de la Real Sociedad Española de Física y Química (1972-75). Vocal adscrito al Consejo Nacional de Educación (1973). Miembro de un Grupo de Trabajo de la Ponencia de Investigación Científica y Técnica del IV Plan Nacional de Desarrollo (1974-75). Miembro de la Comisión de Asesoramiento del MEC para el Desarrollo de la Cooperación Educativa, Cultural y de Investigación entre España y USA (1976-77). Vicedecano de la Facultad de Ciencias de la Universidad Complutense (1972-75). Miembro de la Comisión de la Junta Nacional de Planes de Estudio, de las Secciones de Física de las Facultades de Ciencias (1972). Miembro del Consejo Técnico Asesor del antiguo Patronato "Alfonso el Sabio" del C.S.I.C. (1971). Vicepresidente y desde 1984, Presidente de la Real Sociedad Española de Física y Química. Desde 1982, Presidente del Comité Nacional de "Unión Radio Scientificque International (URSI)". En esta Unión es, además, Presidente nacional de la Comisión B (Campos y Ondas) y pertenece al Consejo y al Comité de Países Miembros, de carácter internacional. Desde 1975, Director del Departamento de "Electricidad y Electrónica" de la Universidad Complutense. Desde 1978 Director del Instituto de Electricidad y Automática del C.S.I.C., hasta la desaparición del mismo en 1986. Vicerrector de la Universidad Complutense (1985).

Hay que señalar que debido a su dedicación a la docencia e investigación le fué otorgado el ingreso en la orden Civil de Alfonso X el Sabio (en su Sección al mérito docente - 1981), así como la medalla del Centenario del "Instituto of Electrical and Electronic Engineers" - New York - 1984.

La brillante carrera científica del Prof. Rodríguez Vidal ha tenido como consecuencia la formación de una gran escuela en el campo del Electromagnetismo y de la Electrónica Física, cuyos protagonistas son el gran número de discípulos suyos que siguen los caminos de investigación trazados por él y continúan formando grupo, a pesar de la dispersión motivada por su acceso a Cátedras Universitarias.

Acabamos de escuchar el brillante y documentado discurso de nuestro nuevo compañero, en el que expone con admirable claridad el interesante tema del efecto fotovoltaico, que tanta importancia ha adquirido en los últimos tiempos y que ofrece grandes perspectivas, para un futuro próximo, en la utilización de los dispositivos para la conversión de energía solar en eléctrica.

Sobre esta conversión desearía hacer algunos comentarios, dirigiendo mi atención y señalando algunas ideas sobre el proyecto de captar la energía solar en el espacio, mediante los denominados satélites de potencia eléctrica, proyecto de gran envergadura que se está estudiando en EE.UU. y en Europa, y cuya posible realización podemos situarla hacia los primeros años del siglo XXI.

Uno de los inconvenientes mayores de aprovechar la energía solar en la superficie de la Tierra es la atenuación que sufre debido a la atmósfera y a las nubes y lluvia por un lado, y por otro a la interrupción de la radiación solar durante la noche. Estos inconvenientes se pueden subsanar captando la energía en el espacio, donde aquella se pueda aprovechar continuamente y donde la densidad de energía es diez veces mayor que el promedio de la recibida en Europa.

Para captar la energía en el espacio se ha ideado poner en órbita un satélite que sería una estación convertidora de energía solar en electricidad. El primero en describir este procedimiento de captar la energía solar fue Peter Gasser en 1968. El satélite, en órbita geostacionaria (es decir, que el satélite permanece estacionario respecto de un punto de la Tierra) estaría situado a unos 36.000 kms. de distancia de la superficie de la Tierra.

La transmisión de la energía se puede realizar por medio de láser o de microondas. La tecnología del láser de gran potencia no se ha desarrollado aún. Así pues, actualmente, se considera que la transmisión de potencia por microondas, cuya tecnología se conoce bien, es el sistema más adecuado. Para evitar la posible interacción del haz de potencia de microondas con la ionosfera, la cual afectaría a las comunicaciones, se trata de que el haz no se enfoque muy estrechamente, lo cual exige gran superficie de la estación receptora.

Los estudios de la NASA sobre el sistema de satélites de energía solar, preconiza, en principio, el uso de la conversión fotovoltaica y la transmisión por microondas.

El satélite de potencia solar, consiste, esencialmente en un conjunto muy amplio de células solares. Estas pueden ser, de arseniuro de galio y de aluminio (Ga Al As) o de silicio. Las primeras tienen un gran rendimiento de conversión a altas temperaturas, lo cual ofrece la gran ventaja

de poder utilizar eficazmente sistemas ópticos de concentración de espejos o lentes, con objeto de amplificar la conversión. Al lado de estas ventajas hay que mencionar el inconveniente de que es un material poco corriente, que se obtiene principalmente de la bauxita, como un subproducto en la obtención del aluminio. La rareza de este material lo hace costoso. Hay que tener presente que la producción mundial de este producto no bastaría para suministrar el necesario para los satélites de potencia solar.

Por otro lado, tenemos que el silicio es un material muy abundante en la corteza terrestre y muy barato. Sin embargo, tiene el inconveniente de que el rendimiento de las células solares de silicio disminuye apreciablemente con el aumento de la temperatura. Por consiguiente no podemos utilizar sistemas de concentración óptica, como es el caso del arseniuro de galio. También hay que señalar que el silicio puede deteriorarse por efecto de las radiaciones.

Para llevar a cabo el proyecto de satélite de potencia solar es necesario incrementar la producción de células solares, que es insuficiente actualmente, así como progresar en los procesos de ensamblado y de integración y desarrollar una construcción modular en el espacio.

La demanda creciente de células solares para usos terrestres, debido al gran número, siempre en aumento, de sus aplicaciones, marcará, sin duda, el camino para los sistemas espaciales.

Es interesante señalar que para cada s.p.s. se necesitarán del orden de 2×10^{10} células.

El área cubierta en el s.p.s. por las células en el caso del silicio es del orden de 52 km^2 mientras que en el caso de arseniuro de galio es de unos 26 km^2 .

Otra parte importante del satélite es la antena de transmisión de microondas, montada en un extremo de la estructura principal. Esta antena tiene un diámetro de 1 km. Está constituida por módulos transmisores klystron y la frecuencia escogida es de 2,45 GHz, que se halla en la banda científica e industrial.

En tierra, la antena receptora y rectificadora, que se denomina rectena, ocupa un área de unos 130 km^2 .

La rectena está constituida por gran número de diodos receptores, conectados a un sistema de rectificadores y filtros que alimenta los conductores serie-paralelo que transportan la energía eléctrica de corriente continua del orden de 5 GW, que se convierte en corriente alterna y alimenta la red eléctrica general. Se necesitarían unos 50 satélites de este tipo, para cubrir las necesidades actuales en energía eléctrica de EE.UU.

El sistema de satélites de potencia solar tiene la gran ventaja de producir gran cantidad de energía procedente de un manantial inagotable y al propio tiempo no da lugar a polución ni origina productos de desecho, como ocurre con las centrales nucleares y con las centrales que utilizan combustibles fósiles. Sin embargo, presentan también problemas que vamos a exponer sucintamente.

Uno de ellos se refiere a la acción biológica producida por la radiación de microondas. Preocupa en los medios científicos la posible acción perjudicial, bajo el punto de vista biológico, de estas radiaciones particularmente a largo plazo, incluso siendo de bajo nivel. Este puede ser elevado en las proximidades de la antena receptora. Los efectos de estas radiaciones, tienen que ser estudiados y por ahora no se pueden señalar cuales sean los resultados de estas investigaciones.

Otro aspecto a considerar es el problema de las interferencias de radio frecuencias entre el haz de microondas y otros sistemas electrónicos. Estas interferencias pueden producirse con las radiaciones de frecuencia primaria de 2,45 GHz y con ciertos armónicos. Por otro lado, la interacción entre el haz y la ionosfera puede afectar a los sistemas que utilizan la reflexión ionosférica. Los estudios realizados hasta la fecha muestran que estos problemas de interferencias deberán tenerse en cuenta en el diseño de sistemas electrónicos que tengan que operar en la proximidad de la antena receptora, pero se considera que, en general, tendrán solución adecuada.

Otro problema será el transporte al espacio de los materiales para construir el satélite de potencia solar. Dada la estructura de grandes proporciones del satélite propuesto no puede ensamblarse en la tierra y después lanzarse al espacio como se hace con los satélites actuales. La estación espacial debe ensamblarse en órbita con materiales y componentes traídos de la Tierra en sucesivos viajes.

El desarrollo del sistema de transporte espacial requiere poner en órbita gran número de hombres y materiales y ello presenta, sin duda, problemas tales como la contaminación atmosférica, polución y posibles fallos en el prelanzamiento o postlanzamiento. Por lo que se refiere a hombres y materiales hay que tener en cuenta, que la construcción de una base permanente requerirá del orden de 500 a 600 hombres trabajando en el espacio y el transporte de unas cien mil toneladas de material.

Hay que mencionar también el problema de decidir la situación de la antena receptora y rectificadora en la Tierra. La potencia de 5 GW desarrollada en la antena terrestre, requiere que ésta tenga una estructura de aproximadamente 130 km². Encontrar un área de estas dimensiones alejada de actividades industriales o domésticas es difícil en Europa.

Bajo el punto de vista técnico surgen también algunos obstáculos a este proyecto. Uno de ellos se refiere al sistema de transmisión de microondas y concretamente al control del haz. Los requisitos muy rigurosos exigidos para el control de la radiación de microondas da lugar a demandas muy severas para la antena del satélite de energía solar. El funcionamiento de la antena espacial es muy crítico, la anchura del haz de microondas es menor de medio minuto de arco y para mantener la situación del haz en la Tierra dentro de un círculo de unos 300 m de diámetro, es necesario lograr una exactitud del haz muy grande, con un error inferior a 2 segundos de arco. Estas condiciones de exactitud del haz de microondas deben mantenerse continuamente para evitar que la radiación alcance a lugares poblados de la Tierra.

Otra consideración importante es la que se refiere a la enorme cantidad de células solares que se necesitarán. Actualmente la producción mundial de células solares que pueden utilizarse en el espacio es de $2,5 \times 10^6$. Para cada satélite de energía solar se necesitarían aproximadamente 2×10^{10} células. Para que esta producción fuera económica se necesitarían técnicas de producción masiva como se utilizan hoy en la industria de semiconductores.

En 1977 el Departamento de Energía de EE.UU. y la NASA iniciaron un programa de estudio y evaluación de las posibilidades de los s.p.s. y en Europa la "Agencia Europea espacial" hizo un informe que publicó en 1979 sobre "Estudio de los aspectos europeos de los satélites de potencia solar".

Todo hace pensar que caso de llevarse a cabo el proyecto de los s.p.s. serían EE.UU. e incluso la Unión Soviética, los países que emprenderían su desarrollo como mayor manantial de energía. Por otro lado, dada la magnitud del proyecto, y el gran número de implicaciones internacionales que, sin duda, tendría, sólo podría realizarse con la cooperación internacional.

Ante la gran envergadura de este proyecto, España podría adoptar dos posiciones diferentes. Bien abstenerse de participar en el proyecto y comprar en su día la energía eléctrica de los satélites de energía solar instalados por EE.UU. o por el país que los desarrolle. En este caso, el coste de la energía eléctrica adquirida sería bastante elevado debido al natural deseo por parte del país o países que han llevado a cabo el proyecto, de resarcirse de los gastos de desarrollo. Por otro lado, en este caso, existe el inconveniente de tratar con un único suministrador de energía.

El otro camino es que España pueda participar activamente en el proyecto, desde el primer momento, como país o como miembro de la Comunidad Económica Europea. Esta participación nos llevaría a ser socios, con todos los derechos que ello implicaría a la hora de realizar la distribución de energía eléctrica.

Hay que tener presente que la realización de un proyecto de estas dimensiones llevaría consigo el desarrollo de sectores industriales de tecnología avanzada como la producción de células solares, control de satélites, componentes de microondas, construcción de estaciones espaciales, suministro de materiales etc. Por consiguiente las oportunidades que se presentan de empleo, económicas e industriales, son muy grandes aunque la participación fuera pequeña.

Actualmente el mercado potencial de los satélites de potencia solar no se limita únicamente a EE.UU. y Europa sino que todos los países en vías de desarrollo exigirán, en el futuro, un mayor suministro de energía, para asumir su crecimiento económico e industrial.

El proyecto de obtener energía solar mediante satélites se estudia muy seriamente en EE.UU. y probablemente en la Unión Soviética, como realización posible a principios del próximo siglo. Los argumentos para decidir la realización de este proyecto no serán de tipo técnico, sino más

bien políticos, económicos e incluso ambientales.

Hemos tratado sucíntamente de una aplicación posible y muy importante de las células fotovoltaicas, como complemento al discurso profundo y exhaustivo del recipiendario.

Deseo, antes de terminar, reiterar, en nombre de la Real Academia de Ciencias, nuestra bienvenida al Prof. Maximino Rodríguez Vidal, junto con mi cordial felicitación y un entrañable abrazo.

Su incorporación a nuestra vida académica representará, dadas las cualidades científicas y humanas de nuestro nuevo compañero, una aportación de gran valor que contribuirá, sin duda, al mayor prestigio de la Real Academia y de la Ciencia española.