

**¿Qué hacen por nosotros
los semiconductores?**

1ª edición, 2025

© Ignacio Mártel de la Plaza

© Guillermo Escolar Editor S.L.
Calle Princesa 31, planta 2, puerta 2
28008 Madrid
info@guillermoescolareditor.com
www.guillermoescolareditor.com

Diseño de cubierta: Javier Suárez

Maquetación: Equipo de Guillermo Escolar Editor

ISBN: 979-13-87789-21-3

Depósito legal: M-18362-2025

Impreso en España / Printed in Spain

Reservados todos los derechos. De acuerdo con lo dispuesto en el Código Penal, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes, sin la preceptiva autorización, reproduzcan o plagien, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, fijada en cualquier tipo de soporte.

Ignacio Mártil de la Plaza

¿Qué hacen por nosotros los semiconductores?

El petróleo del siglo XXI

**Guillermo
Escolar**
E D I T O R
Análisis y crítica

Nadie debería investigar sobre semiconductores. Son una porquería. ¿Quién sabe si realmente existen?

Comentario de Wolfgang Pauli –Premio Nobel de Física de 1945– dirigido en 1931 a Rudolph Peierls, colaborador del Proyecto Manhattan.

PRÓLOGO

Los lectores aficionados al cine que hayan visto *La vida de Brian*, la genial película de Monty Python, habrán reconocido algo familiar en el título de este libro. La película contiene múltiples escenas desternillantes, pero hay una en especial que es, sencillamente, sublime. En una reunión clandestina, varios conspiradores judíos discuten acerca de lo que habían hecho por sus vidas los romanos, y, poco a poco, llegan a la conclusión de que todo lo que tenían en esos momentos se lo debían a ellos, a los romanos. La figura P.1 recuerda aquella mítica escena.



Figura P.1. ¿Qué han hecho los romanos por nosotros? Plano de *La vida de Brian*¹.

En cierto sentido, cambie el lector la palabra «romano» por «semiconductor» y tendrá la idea que inspira este libro. De hecho, podría plantearse la pregunta de otra forma: ¿hay algo en nuestra vida cotidiana que no se lo debemos a los semiconductores? Anticipo la respuesta (destripe o spoiler, como se dice hoy en día): NO.

Desde que empecé mi tesis doctoral (en el otoño de 1979) hasta el tiempo en que este libro ve la luz han pasado la friolera de 46 años, ¡casi medio siglo! Toda mi vida académica, y alguna parte de mi vida de ocio, la

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=WYU5SAQwc4I>

he dedicado al estudio de los semiconductores, esos asombrosos materiales que, aunque no lo sepamos, están instalados en nuestra vida diaria hasta extremos difíciles de entender para el público no especializado y para una parte del especializado, también.

Mi recorrido científico dentro del campo de los semiconductores es bastante variado. Empezando por mi tesis doctoral, en la que estudié el CdS , de utilidad en dispositivos fotovoltaicos de lámina delgada, posteriormente los semiconductores policristalinos Cu_xS , CuInSe_2 y CuGaInSe_2 , también de aplicación en dispositivos fotovoltaicos. Hoy en día, esos materiales son el núcleo de un tipo de célula solar que ha alcanzado un notable éxito comercial, lo cual ni en el mejor de mis sueños podía imaginar que llegara a suceder.

A principios de la década de 1990, me dediqué a los aislantes $\text{SiN}_x\text{:H}$, $\text{SiO}_x\text{:H}$, $\text{SiO}_x\text{N}_y\text{:H}$, de interés en dispositivos clave en la industria microelectrónica, y su aplicación en transistores de efecto campo basados en InP e InGaAs , dos de los semiconductores compuestos más interesantes por sus utilidades en el campo de la alta frecuencia. A partir de los primeros años de este siglo, me involucré en estudiar las posibilidades del silicio (Si) como detector de infrarrojo, así como en nuevos conceptos en células solares basadas de nuevo en Si . Como se aprecia, todo mi afán científico lo he dedicado a entender las propiedades de estos materiales.

En paralelo, y de la misma importancia en mi desarrollo personal y profesional –sí, también en el personal–, desde que fui profesor titular primero (1986) y catedrático de Electrónica después (2007), mi actividad docente ha estado siempre vinculada a transmitir a mis estudiantes las propiedades y algunas de las aplicaciones de estos asombrosos materiales.

Simultaneando estas actividades, desde hace más de una década intento explicar a los ciudadanos interesados en estos asuntos los entresijos de la ciencia y de la historia que hay detrás de ellos. Así, en 2018 publiqué mi primer libro sobre la historia de la microelectrónica, en 2020 sobre el campo de la energía solar fotovoltaica, y en 2023 hice una excursión por la historia del radar y sobre el papel que los semiconductores jugaron en su desarrollo, uno de los grandes desconocidos de la historia de la ciencia del siglo xx . Los tres tienen a los semiconductores como protagonistas, aunque el tercero en menor medida que los otros dos.

A la vista de mi trayectoria, parece obvio que creo firmemente que los científicos debemos ser capaces de comunicarnos con los ciudadanos ajenos a nuestro oficio, y describir el contexto y la historia de nuestros temas

especializados debe constituir sin duda una parte vital de esa comunicación. Confieso mi gran afición a desentrañar la historia de aquellos asuntos científicos que he tenido el privilegio de conocer en profundidad, y uno de los propósitos de este libro, entre otros que mostraré en su desarrollo, es dar a conocer a sus lectores unas pequeñas pinceladas históricas de los diversos asuntos que abordo en él.

El objetivo no ha sido nada fácil de cubrir, porque trasladar a un lenguaje universal el muy especializado de la ciencia y la tecnología de los semiconductores no es nada sencillo. Siempre tengo miedo de trivializar conceptos e ideas que son intrínsecamente complejos, porque, digámoslo claramente, **divulgar no es trivializar**. Ese dicho de tanto éxito entre algunos comunicadores científicos que dice aquello de que divulgar es algo parecido a «contar la teoría de la relatividad como se la contarías a tu abuela» no lo comparto en absoluto, salvo que tu abuela sea física.

Ahora que mi jubilación está a la vuelta de la esquina, va siendo hora de rendirles homenaje en forma de libro a los semiconductores, de forma que cualquiera que se anime a leerlo pueda entender hasta qué punto son importantes en nuestro mundo. Leída hoy, la afirmación de Wolfgang Pauli que abre este libro –«¿quién sabe si realmente existen los semiconductores?»–, se preguntaba el científico austríaco hace poco más de un siglo–, parece una broma, un anacronismo o una mezcla de ambos, a la vista del papel hegemónico que tienen en la actualidad. Pero no siempre ha sido así y una parte del contenido de este libro está destinada a entender las dificultades a las que se enfrentaron quienes «abrieron brecha» en su momento para lograr alcanzar desarrollos viables comercialmente y útiles socialmente. Creo firmemente que la física y la tecnología de los semiconductores representan un logro de la humanidad, a la altura de los acueductos romanos –de nuevo los romanos– o la música de Haendel. Sé que esto a algunos les parecerá una especie de sacrilegio profano, pero estoy firmemente convencido de la veracidad de lo que digo.

1. ¿INTERESA LA CIENCIA?

Otro destripe-spoiler: SÍ. Entendiendo la ciencia podremos entender por qué nuestra vida cotidiana es tan diferente de lo que fue la de nuestros padres y abuelos. Parece obvio que la ciencia ha cambiado nuestras vidas de un modo inimaginable hace solo unos años. Vean, vean la figura P.2.



Figura P.2. Unos jóvenes en 2022... y en 1910. Seguro que no hace falta explicar cuál es cuál².

Hay muchas razones por las que los científicos debemos divulgar, ya que cuando pienso en el futuro que aguarda a nuestros hijos, me surgen diversos interrogantes: ¿qué mundo van a heredar?, ¿seguirán viviendo en un país que nunca ha hecho una apuesta decidida por la ciencia y por la innovación? Siempre que pienso en esta cuestión me viene a la cabeza aquello del «cambio del modelo productivo», que tanto se invocó al comienzo de la Gran Recesión en 2008. Casi dos décadas después, tras la pandemia, la guerra de Ucrania, la guerra en Gaza o el desastre de la DANA en Valencia, no sé en qué ha cambiado ese modelo, si es que lo ha hecho.

Tal vez dando a conocer a amplias capas de la población lo que la ciencia puede hacer por mejorar nuestra vida sería posible iniciar ese anhelo

² Tic's (Tecnologías de la Información y la Comunicación), (<https://bit.ly/3ZeEB17>); S. R. Schneider, «What Men REALLY Wore in the 1910s» (<https://bit.ly/3OgIohW>).

cambio. La divulgación es una tarea permanente, casi diaria y no algo que haya que hacer únicamente en ocasiones especiales; debe formar parte íntegra de las obligaciones cotidianas de cualquier profesor universitario que se precie de serlo y que sea consciente de que no vive en un mundo aparte, de que tiene el privilegio de acceder a conocimientos que casi nadie posee y tiene conciencia de que, no siendo el centro del mundo, puede contribuir a que el mundo esté un poco más centrado.

Soy un privilegiado que he podido desempeñar mi actividad profesional en un campo tan creativo y enriquecedor como este y es de justicia que trate de devolver a la sociedad lo poco o mucho que puedo aportar. Se da una curiosa paradoja en nuestro país: de una parte, los científicos somos una de las profesiones mejor valoradas por la ciudadanía, pero de otra, la cultura científica de la sociedad brilla por su ausencia. Carl Sagan, el gran astrofísico y mejor divulgador lo decía así:

Vivimos en una sociedad totalmente dependiente de la ciencia y la tecnología, en la cual prácticamente nadie sabe nada acerca de la ciencia o la tecnología³.

La única manera de lograr que se valore la ciencia es lograr que la sociedad sepa lo que hacemos los científicos. Se dice, y con razón, que sin ciencia no hay futuro, pero sin divulgación de la ciencia tampoco hay futuro para la ciencia.

Desgraciadamente, la comunicación científica en España es manifiestamente mejorable y una parte de la culpa de que esto sea así la tenemos los científicos. Buscar a ciegas en Google, en general, no suele ser la mejor opción, pero es un recurso frecuente entre la ciudadanía cuando trata de averiguar detalles sobre alguna noticia científica, porque habitualmente o los científicos estamos desaparecidos, o el interés de los medios de comunicación por lo que hacemos es residual. Tuvimos ocasión de verlo en 2020 con motivo de la pandemia del coronavirus y pudimos comprobar entonces, una vez más, el terreno abonado a toda clase de bulos que se dan en una sociedad poco informada de lo que la ciencia hace, de lo que puede hacer y, también, de sus limitaciones. Si la sociedad estuviera bien informada sobre la repercusión que tienen nuestros trabajos, tendría otra percepción de la ciencia y de su utilidad.

³ Carl Sagan, *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark*, Ballantine Books, New York, 1997.

2. CONTENIDOS DE ESTE LIBRO

Antes de pasar a describir los contenidos del libro, déjeme que le haga una confesión, que imagino que usted, amable lector, da por supuesta: hago esto porque disfruto haciéndolo, creo que es obvio que no hay sufrimiento alguno en la tarea de explicar qué es un semiconductor o cómo funciona una bombilla LED. También quiero destacar que el tono y el estilo del libro que tiene entre sus manos está pensado para lo que denomino mi «público diana», integrado por todos aquellos ciudadanos que, no teniendo formación especializada, sienten interés por la ciencia y sus objetivos: ese es el lector al que me dirijo en mis actividades de divulgación. Sin olvidar, cómo no, a mis estudiantes, a los que este libro creo que les resultará de gran utilidad y les servirá para ampliar su visión acerca de los semiconductores, desde una perspectiva diferente a la más académica con que abordamos su estudio en el aula.

El libro está escrito en un lenguaje todo lo asequible que soy capaz de escribir. Algunos puntos de algunos capítulos están marcados con asteriscos, lo que indica que ese punto en concreto no es de lectura sencilla, pero el lector los podrá omitir sin perder continuidad en el resto del libro, si así lo desea.

Como aspecto esencial del libro y con objeto de facilitar en la medida de lo posible la comprensión de los asuntos que trato, el texto está ilustrado con 181 figuras. Tras dos capítulos introductorios, el libro se estructura en dos grandes bloques: el primero dedicado por entero al silicio, integrado por siete capítulos, y el segundo dedicado al resto de semiconductores, estructurado en otros cinco, más un Apéndice. La razón de esto es bastante obvia; por una parte, el silicio es el semiconductor hegemónico, ya que desde la electrónica de los teléfonos móviles a la de la Inteligencia Artificial, todos los grandes hitos de la electrónica moderna se articulan en torno al silicio. Por otra y como tendremos ocasión de ver, el silicio tiene limitaciones que le hacen inviable para cierto tipo de aplicaciones de gran relevancia: emisión de radiación, electrónica de alta frecuencia, electrónica de potencia, etc. Ese es precisamente el lugar para los otros semiconductores que veremos en la segunda parte del libro, cuya estructura detallada es la siguiente:

- El capítulo 1 está dedicado a presentar al lector la infinidad de actividades, tanto profesionales como de ocio y de vida cotidiana, en las que los semiconductores juegan un papel clave. Por resumir el contenido en una frase célebre: tenemos semiconductores hasta en la sopa.

- El capítulo 2 describe lo que muchos autores ya denominan «el petróleo del siglo XXI». Muestro algunas de las infinitas peculiaridades de estos materiales.

Primer bloque

- El capítulo 3 recorre brevemente la historia del uso del silicio como semiconductor, que le ha conferido la categoría de rey absoluto de este mundo.
- El capítulo 4 mete de lleno al lector dentro de un circuito integrado, para ver de qué está compuesto este prodigio de la ciencia y la tecnología. En la terminología anglosajona, al circuito integrado se le denomina también «chip», denominación que usaré en este libro.
- El capítulo 5 es uno de los más técnicos del libro, ya que en él describo las tecnologías que permiten fabricar los semiconductores, los dispositivos y los chips.
- El capítulo 6 está conectado directamente con el anterior y muestra las peculiaridades del proceso más crítico de fabricación de un chip: la fotolitografía. Dada su importancia, que va más allá de la propia técnica y alcanza niveles de geoestrategia, he considerado adecuado dedicarle un capítulo específico.
- El capítulo 7 presenta con gran detalle una de las cuestiones de más relevancia en la tecnología actual de los chips de silicio: el nodo tecnológico. Para no adelantar contenidos, el lector encontrará allí una amplia discusión del asunto.
- El capítulo 8 analiza los dispositivos que nos permiten hacer fotos o grabar vídeos con las cámaras de nuestros teléfonos móviles, que es uno de los aspectos al que los compradores de un nuevo terminal prestan mayor atención. Describo aquí los denominados CCD –Charge Coupled Device, dispositivos acoplados por carga–.
- El capítulo 9 se dedica a analizar cuestiones relevantes de la aplicación del silicio en dispositivos fotovoltaicos. Esta es una temática que ya he analizado extensamente en otro libro⁴, por lo que aquí solo analizo los últimos avances en este campo. Un libro sobre semiconductores y sobre silicio no puede olvidar un campo de tanta importancia y proyección de futuro como es la energía solar fotovoltaica, razón por la que está presente.

⁴ I. Mártel, *Energía solar. De la utopía a la esperanza*, recogido en la Bibliografía.

Segundo bloque

- El capítulo 10 presenta, de forma organizada, cuáles son los otros semiconductores que no son silicio: los semiconductores compuestos.
- El capítulo 11 entra en los dispositivos capaces de emitir radiación: los diodos emisores de luz –LED, Light-Emitting Diode– y los Láser, gracias a los cuales disfrutamos de iluminación eficiente, comunicaciones rápidas y un sinfín de otras utilidades.
- El capítulo 12 muestra algunas de las aplicaciones menos «civilizadas» de los semiconductores: los detectores de radiación, esenciales en los sistemas de guía de misiles. También muestra la utilidad de esos detectores en aplicaciones más pacíficas y trascendentales para comprender el universo: el uso de los semiconductores en los grandes telescopios, como es el caso del James Web Space Telescope.
- El capítulo 13 muestra cuáles son los semiconductores diferentes del silicio con los que podemos obtener energía, otra de las grandes cuestiones candentes de nuestro tiempo.
- El capítulo 14 describe los principales semiconductores y aplicaciones de uso en dos terrenos a los que las propiedades del silicio le impiden dar respuesta: velocidad y potencia, es decir, semiconductores especiales para su uso en alta frecuencia y alta potencia. Aquí, el lector encontrará los semiconductores que se integran en una aplicación cada día de mayor actualidad e interés: el vehículo eléctrico.
- En el último capítulo, el 15, describe la asombrosa industria de los semiconductores, una de las de mayor importancia estratégica en la actualidad.
- Para finalizar los contenidos científicos y descriptivos, hay un Apéndice que recoge los aspectos más técnicos y las propiedades esenciales de los semiconductores.
- He escrito todos los capítulos –salvo el 5 y el 6, que forman un todo único– de manera que un lector interesado en alguno de los contenidos pueda leer ese capítulo específico sin haber leído previamente los que le preceden. En todo caso, el lector se formará una idea más completa de la importancia de los semiconductores leyendo el libro en su integridad.
- El último apartado es una sección bibliográfica donde he recogido las principales referencias que he utilizado para la escritura

de este libro. La bibliografía sobre semiconductores es abrumadora e inabarcable, se necesitarían varias vidas para poder analizarla. Como solo tengo una y el lector solo tiene otra, he seleccionado cuidadosamente qué referencias incluir en este apartado y las he organizado de la siguiente manera: aquellas referencias que son muy específicas y concretas (una patente, un dato particular, un pie de figura, etc.), aparecen como notas al pie dentro del cuerpo general del texto. Las referencias de carácter más generalista que abarcan buena parte de los contenidos de uno o varios capítulos están agrupadas por capítulos o grupos de capítulos de temática común.

Para que el lector pueda hacerse una idea de la cantidad de documentos que se publican en el mundo sobre este asunto, excluyendo páginas web, la figura P.3 muestra el número de publicaciones por año que recoge el portal científico Scopus. Muestro la evolución desde la invención del circuito integrado (1960) hasta diciembre de 2024, último año del que disponemos de datos completos. Estamos por encima de los ¡2.5 millones de documentos! dedicados a los semiconductores. ¿Entiende usted lo de poseer varias vidas?

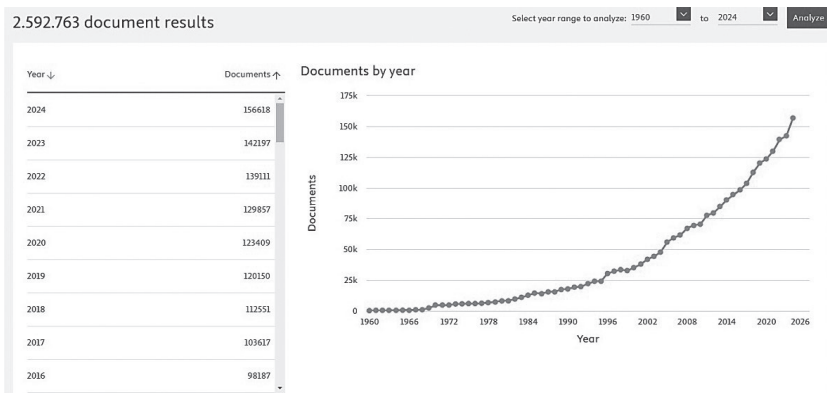


Figura P.3. Número de publicaciones por año sobre semiconductores, para el período 1960-2024. La tendencia es siempre creciente, un año tras otro⁵.

⁵ Scopus (<https://www.scopus.com/standard/marketing.uri>). En una búsqueda bajo el epígrafe «Semiconductors» se obtienen más de 2.5 millones de documentos.

3. AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS (TANTO MONTA, MONTA TANTO)

Quienes me conocen no se sorprenderán al mostrar aquí mi primera y más emotiva dedicatoria, dedicada a mi muy querido hijo Andrés. Me siento la persona más afortunada del mundo por poder manifestar en estas líneas lo mucho que él representa para mí, en todos los planos de la vida, los obvios del cariño paterno y los vinculados a las reflexiones y discusiones, más o menos sesudas, que mantenemos con frecuencia. Todos constituyen una riqueza que me hace sentir un privilegiado. Y también quiero manifestar mi gratitud por recibir de su parte todos los parabienes y ánimos que me regala continuamente para seguir adelante con este oficio de escribir.

Un agradecimiento especial va destinado a mis compañeros del Grupo de Láminas Delgadas y Microelectrónica de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, a quienes también dedico este libro. Con ellos he ido aprendiendo a lo largo de los años buena parte de lo que sé sobre los semiconductores. A diario, mantenemos discusiones de los asuntos más variados, desde los de naturaleza científica, pasando por los relacionados con nuestras responsabilidades docentes y llegando a otros de la más diversa naturaleza, entre los cuales está incluida, cómo no, la política, tanto la académica como la general. Estas charlas representan uno de los momentos más agradables del día, a pesar del clima tan crispado que lamentablemente vivimos en nuestro país. Esto es así gracias a que los jóvenes compañeros con los que comparto mesa y mantel a diario –de ideologías variadas y tan diversas como lo es nuestra sociedad– son amables, respetuosos y, algo esencial para la convivencia, dotados de un excelente sentido del humor. Ese conjunto único y extrañísimo de cualidades que tienen y que procuramos cuidar entre todos como un tesoro hace que el día a día se convierta, si no en una fiesta (tampoco nos vengamos arriba), sí en algo muy grato.

Por supuesto, en la lista de agradecimientos/dedicatorias no pueden faltar mis estudiantes, cuyo trato cotidiano es uno de los aspectos más estimulantes de mi trabajo. Una de las peculiaridades de mi oficio es que mis alumnos tienen siempre la misma edad, entre 21 y 24, lo que me permite un curso tras otro estar en contacto siempre con jóvenes estudiantes, con grandes ganas de aprender y con el ímpetu característico de sus jóvenes vidas. Gracias a ese contacto, mi ritmo de envejecimiento es muy inferior al marcado irremediablemente por las leyes de la biología, aspecto en el que ellos no reparan, pero que para mí es un verdadero regalo. El contacto con sus ganas de aprender y entender toda la magia que esconden los semi-