



# Estudio comparativo y diseño de fotodiodos integrados y estructuras de test en tecnología CMOS para recolección de energía solar

## Trabajo de Fin de Grado

Departamento de Electrónica y Electromagnetismo

Universidad de Sevilla

Autor: Álvaro Pulido Muñoz

Tutores: Juan Antonio Leñero Bardallo  
Pablo Fernández Peramo



# Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se realiza un estudio comparativo de distintos fotodiodos integrables en tecnología CMOS estándar, así como de diferentes estructuras compuestas por estos, con el fin de optimizar un parámetro fundamental para la recolección de energía solar: la tensión de circuito abierto. Estos fotodiodos constituyen el pilar fundamental en cuanto a transductores lumínicos se refiere, y son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones, tales como la recolección de energía o la detección del nivel de iluminación, entre otras. De ahí su gran importancia.

En el Capítulo 1 se estudian los fundamentos físicos en los que se basa el funcionamiento de los fotodiodos, así como su fabricación y una presentación del circuito de test que utilizaremos para la futura caracterización de los mismos en el laboratorio. Luego, se hace una revisión del estado del arte, y se presentan los objetivos buscados en el trabajo.

En el Capítulo 2 se estudian los fotodiodos básicos integrables en la tecnología. Se presentan sus secciones transversales, así como sus equivalentes circuitales. Luego, se obtienen las ecuaciones que rigen su comportamiento, las cuales reflejan las ventajas de unos fotodiodos frente a otros. Por último, se expone su layout físico, integrado en tecnología UMC 180 nm, bajo las herramientas de diseño de CADENCE, para integrarlo cuando se le proporcione al fabricante.

Por último, en el tercer y último capítulo, se estudian estructuras más complejas formadas por los fotodiodos básicos ya mencionados. Estas estructuras son tanto estructuras del estado del arte, como nuevas estructuras propuestas nunca antes estudiadas ni diseñadas bajo nuestro conocimiento. Se proponen un total de cinco estructuras, donde el objetivo es, mediante cambios escalonados, llegar a una estructura más ventajosa que las existentes si cabe.



# Índice general

Resumen	i
Índice de figuras	v
<b>1. Motivación, Revisión del Estado del Arte y Objetivos</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación	1
1.2. Fundamentos teóricos	3
1.2.1. La unión PN	3
1.2.2. La unión PN iluminada	5
1.2.2.1. Análisis Cualitativo del fotodiodo. Deducción de su característica I-V	5
1.2.2.2. Análisis Cuantitativo del fotodiodo. Ecuaciones de modelado. Modelo circuital	9
1.2.3. Fabricación física de un fotodiodo integrado en tecnología CMOS	12
1.2.4. Dependencia de la fotocorriente generada de parámetros físicos	14
1.2.4.1. Energía incidente	14
1.2.4.2. Interacción Luz-Materia	15
1.2.4.3. Absorción luminica en el silicio	16
1.2.4.4. Longitud de difusión y tiempo de recombinación	17
1.2.4.5. Eficiencia Cuántica	18
1.2.4.6. Expresión de $I_{ph}$	18
1.2.4.7. Dark Current	19
1.2.5. Búffer de Medición	19
1.3. Revisión del Estado del Arte	23
1.4. Objetivos del trabajo	25
<b>2. Análisis de fotodiodos bajo estudio</b>	<b>27</b>
2.1. Nwell/Psub	28
2.1.1. Nwell/Psub: Sección transversal y equivalente circuital	28
2.1.2. Nwell/Psub: Layout Físico	30
2.2. P+/Nwell/Psub	31
2.2.1. P+/Nwell/Psub: Sección transversal y equivalente circuital	31
2.2.2. P+/Nwell/Psub: Layout Físico	32
2.3. N+/Pwell/Deep NWell/Psub	33
2.3.1. N+/Pwell/Deep NWell/Psub: Sección transversal y equivalente circuital	33
2.3.2. N+/Pwell/Deep NWell/Psub: Layout Físico	34

<b>3. Estructuras de fotodiodos</b>	<b>37</b>
3.1. Estructura 1: Propuesta por M. K. Law y A. Bermak, configuración doble etapa (1:1) y configuración doble etapa (8:1) . . . . .	37
3.1.1. Estructura doble etapa (1:1): Sección transversal y equivalente circuital . . . . .	38
3.1.2. Estructura doble etapa (8:1): Sección transversal y equivalente circuital . . . . .	39
3.1.3. Estructura doble etapa (8:1): Layout físico . . . . .	39
3.2. Estructura 2: Compensación en paralelo . . . . .	41
3.2.1. Estructura doble etapa con compensación en paralelo (4:1): Sección transversal y equivalente circuital . . . . .	41
3.2.2. Estructura doble etapa con compensación en paralelo (4:1): Layout Físico . . . . .	41
3.3. Estructura 3: Compensación triple . . . . .	42
3.4. Estructura 4: Compensación en paralelo con salida en paralelo . . . . .	43
3.4.1. Estructura doble etapa con compensación y salida en paralelo: Sección transversal y equivalente circuital . . . . .	43
3.4.2. Estructura doble etapa con compensación y salida en paralelo: Layout Físico . . . . .	44
3.5. Estructura 5: “Boost” de $V_{oc}$ mediante conexión en serie de diodos Schottky	45
3.5.1. Estructura de “Boost” de $V_{oc}$ mediante conexión en serie de diodos Schottky: Sección transversal y equivalente circuital . . . . .	46
3.6. Resumen de Resultados. Comparativa frente al arte . . . . .	47
<b>4. Conclusiones y futuras líneas de trabajo</b>	<b>49</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>51</b>

# Índice de figuras

1.1. Número de publicaciones con las palabras clave: <i>energy harvesting IoT, task scheduling in IoT and batteryless IoT</i> , de la última década. . . . .	2
1.2. Ilustración de un diodo. . . . .	4
1.3. Proceso de generación par electrón-hueco. . . . .	5
1.4. Fotodiodo en circuito abierto. Característica I-V. . . . .	6
1.5. Fotodiodo en circuito cerrado. Característica I-V. . . . .	7
1.6. Fotodiodo conectado a resistencia. Característica I-V. . . . .	8
1.7. Fotodiodo con polarización en reversa. Característica I-V. . . . .	9
1.8. Fotodiodo con polarización en directa. Característica I-V completa. . . . .	9
1.9. Curva I-V del diodo. . . . .	11
1.10. Curva I-V del fotodiodo en función de la fotocorriente generada. . . . .	11
1.11. Equivalente circuital del fotodiodo. . . . .	12
1.12. Construcción de un pozo NWell. . . . .	13
1.13. Tabla de bandgaps y longitudes de onda recolectables para distintos semi-conductores. . . . .	15
1.14. Diferentes procesos de absorción en un dispositivo. . . . .	16
1.15. Esquemáticos del Búffer de medición . . . . .	20
1.16. Simulaciones estáticas del búffer . . . . .	21
1.17. Diagrama de Bode del Búffer . . . . .	21
1.18. Layout de un fotodiodo conectado al Búffer de medición. Área utilizada: 100 $\mu\text{m}$ x 70 $\mu\text{m}$ . . . . .	22
1.19. $V_{oc}$ frente a la iluminación, ambos iluminados con luz blanca. . . . .	24
1.20. Posibles pozos implementables en tecnología Triple Well. . . . .	24
1.21. Tabla de caracterización de distintos fotodiodos en tecnología CMOS. . . . .	25
2.1. Sección transversal y equivalente circuital del fotodiodo Nwell/Psub . . . . .	28
2.2. Layout Físico del fotodiodo Nwell/Psub . . . . .	30
2.3. Sección transversal y equivalente circuital del fotodiodo P+/Nwell/Psub . . . . .	31
2.4. Layout Físico del fotodiodo P+/Nwell/Psub . . . . .	32
2.5. Sección transversal y equivalente circuital del fotodiodo N+/Pwell/Deep NWell/Psub . . . . .	33
2.6. Layout Físico del fotodiodo N+/Pwell/DNW/Psub . . . . .	35
3.1. Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de 2 etapas (1:1) . . . . .	38
3.2. Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de 2 etapas (8:1) . . . . .	39
3.3. Layout físico de una estructura de 2 etapas (8:1) . . . . .	40

---

3.4.	Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de 2 etapas con compensación en paralelo (4:1) . . . . .	41
3.5.	Layout físico de una estructura de 2 etapas con compensación en paralelo (4:1) . . . . .	42
3.6.	Layout físico de una estructura de 2 etapas con compensación en paralelo (4:1) . . . . .	43
3.7.	Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de 2 etapas con compensación y salida en paralelo . . . . .	44
3.8.	Layout físico de una estructura de 2 etapas con compensación y salida en paralelo . . . . .	45
3.9.	Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de “Boost” de $V_{oc}$ mediante conexión en serie de diodos Schottky . . . . .	46



# CAPÍTULO 1

## Motivación, Revisión del Estado del Arte y Objetivos

### 1.1. Motivación

Es el inevitable colapso de nuestro actual modelo energético mundial el principal motor de mi pasión por la obtención de energía. Son cientos de estudios los que afirman el poco tiempo disponible que nos queda con capacidad de utilización de los combustibles fósiles. Se estima que disponemos de reservas de carbón para su uso energético para unos 139 años, 49 años para el Gas Natural y 54 años para el Petróleo (datos de 2020, véase [1]).

La tecnología IoT (“Internet of Things”) se ha convertido en una parte integral de nuestra vida cotidiana. Esta tecnología abarca prácticamente la totalidad de todo lo tecnológico que conocemos en la actualidad, desde robots de limpieza del hogar hasta los sistemas de detección o seguridad más avanzados.

El desarrollo de esta tecnología implica una imperiosa necesidad de dispositivos que sirvan como transductores de lo físico a lo electrónico, y estos conllevan cierto gasto energético para su funcionamiento. Debido al volumen necesario de este tipo de dispositivos, surge la necesidad de que estos sean auto-alimentados, es decir, no requieran una fuente de alimentación externa para su funcionamiento o bien, que seamos capaces de minimizar su consumo, ya que el uso de baterías implica gastos tanto económicos, a la

hora de su necesidad de recambio, como ecológicos, debido a sus materiales de construcción. Tanta es esta necesidad, que el “INTERNATIONAL ROADMAP FOR DEVICES AND SYSTEMS” [2] establece este objetivo como uno de los desafíos más importantes que cumplir para el desarrollo tecnológico.

Uno de los transductores principales para la recolección energética son los fotodiodos, encargados de convertir la luz solar en corriente eléctrica. Estos forman la base fundamental de dispositivos tales como las células solares utilizadas en las placas solares, no obstante, son varios ya los trabajos donde se utilizan en dispositivos de dimensiones mucho más reducidas pertenecientes a la tecnología IoT (sensores de imagen, implantes biomédicos...), para así reducir su consumo energético [3], [4], [5], [6], [7].

Por otro lado, este no es el único transductor que podemos utilizar para reducir el consumo de potencia de los dispositivos, existen otros tales como transductores piezoeléctricos, los cuales convierten vibraciones del ambiente en energía eléctrica; electromagnéticos, que hacen lo propio mediante inducción electromagnética; electrostáticos, mediante la inducción de fuerza eléctrica entre dos electrodos; o termoelectricos, que funcionan gracias al Efecto Seebeck.

Por otro lado, los dispositivos que trabajan la recolección solar son los que mayor potencia generan en función del área consumida ([8], [9]), con lo que el desarrollo de estos dispositivos se hace especialmente atractivo para la tecnología IoT, y será el campo de estudio de este trabajo. Esto se hace patente si observamos el número de publicaciones de este ámbito (Figura 1.1, [9]) .

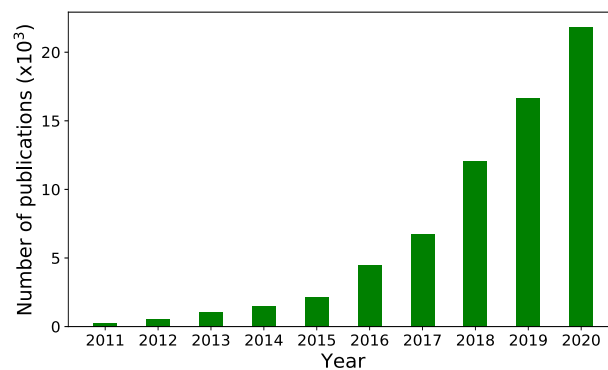


Figura 1.1: Número de publicaciones con las palabras clave: *energy harvesting IoT, task scheduling in IoT and batteryless IoT*, de la última década.

Por último, destacar que la oportunidad que se me brinda de aprender un software de diseño profesional como CADENCE para un trabajo con cierta carga de investigación, ha sido otro de los grandes motivos de la elección de este trabajo.

## 1.2. Fundamentos teóricos

### 1.2.1. La unión PN

Para entender el funcionamiento de un fotodiodo, se debe de partir de la base, es decir, de la unión PN. La unión PN, no deja de ser en esencia, la unión de dos trozos de semiconductor (típicamente silicio) con dopados distintos. Un extremo de la unión, la cual denotaremos “la zona P”, está dopado con átomos aceptores de electrones (columna XIII de la tabla periódica, boro, aluminio, galio...). A esta ausencia de electrones la denominaremos huecos, y se tratarán de igual manera que los electrones, como partículas. Estas tendrán carga positiva y de mismo valor absoluto que la carga del electrón. El otro extremo, denominado “la zona N”, está dopado a la inversa, con átomos con exceso de electrones (columna XV de la tabla periódica, fósforo, arsénico...). A partir de ahora supondremos que tenemos dopado de boro en la zona P y dopado de fósforo en la zona N, para así aclarar la explicación.

Cuando estos dos extremos se ponen en contacto comienza un proceso donde, debido a la diferencia de densidad de electrones y huecos en las inmediaciones de la unión abrupta, los electrones sobrantes de la región N atraviesan la unión y llegan a la región P, donde al ser portadores minoritarios se recombinan rápidamente (llegan electrones a una zona llena de aceptores de electrones), sucede a su misma vez lo inverso para los huecos de la región P. Como conclusión se forma una corriente de difusión, la cual si por convenio tomamos como sentido de la corriente el de los portadores con carga positiva, va de la región P a la región N. Conforme la corriente de difusión sucede, a su misma vez ocurre otro efecto, por el cual los electrones al abandonar las impurezas de fósforo de la región N dejan a este fósforo con ausencia de un electrón, es decir, carga positiva. Una vez que dicho electrón se recombina en la región P con un átomo de boro, el boro adquiere un electrón más y por tanto carga negativa. Sucede lo mismo para los huecos, así pues,

se va acumulando carga fija a ambos lados de la unión. La diferencia de carga crea un campo eléctrico que a su vez crea una corriente de arrastre, en sentido opuesto a la de difusión. Ambos procesos se cancelan cuando ambas corrientes se igualan. El resultado es una región sin apenas portadores de carga, la llamada región de deplexión. Cuando se alcanza este punto, decimos que se ha llegado al equilibrio, y este será el punto inicial de funcionamiento de nuestro fotodiodo, todo esto queda recogido en la figura 1.2.

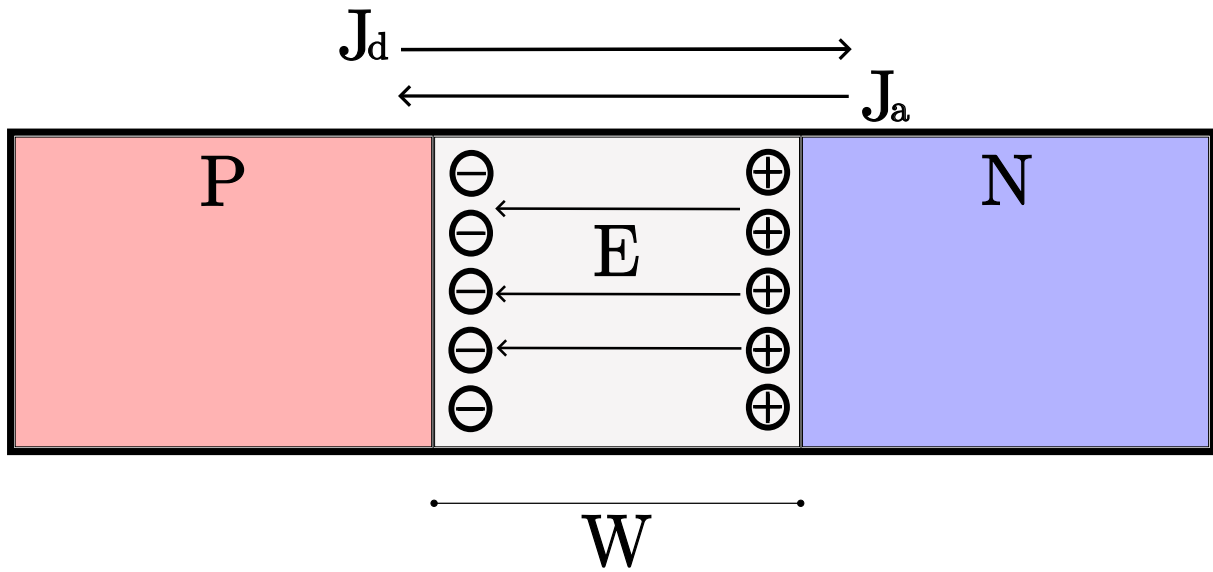


Figura 1.2: Ilustración de un diodo.

Donde observamos en rojo la zona tipo P, en azul la zona tipo N, en gris la región de deplexión con anchura  $W$ , el campo eléctrico  $E$  y las corrientes de difusión ( $J_d$ ) y arrastre ( $J_a$ ). Dado que la anchura de la región de deplexión es un parámetro que afecta en el funcionamiento de un fotodiodo, tal y como se verá en el siguiente apartado, conviene conocer la expresión de dicha anchura. Esta anchura viene dada por la Ecuación 1.1, donde  $\epsilon$  es la permitividad eléctrica del silicio,  $e$  es la carga del electrón,  $V_{bi}$  la tensión "built-in" (diferencia de potencial generada en la región de deplexión) y  $N_a$ ,  $N_d$  las densidades de átomos aceptores y donadores respectivamente [10].

$$W = \left[ \frac{2\epsilon V_{bi}}{e} \left( \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

### 1.2.2. La unión PN iluminada

Cuando un fotón incide sobre la unión PN, este (si posee energía suficiente) es capaz de generar por efecto fotoeléctrico un par electrón-hueco, es decir, es capaz de hacer promocionar un electrón de la capa de valencia del átomo incidente a la capa de conducción. Este es el funcionamiento básico del fotodiodo.

Si este par electrón-hueco se produce en la región de depleción, debido a la existencia del campo eléctrico, se separará el electrón del hueco y no habrá recombinación (aunque siendo precisos puede ser generado fuera, pero lo veremos más adelante). Los huecos seguirán las líneas de campo mientras que los electrones irán en dirección contraria, el resultante es una corriente en el mismo sentido que la corriente de arrastre, esta es la fotocorriente generada ( $I_{ph}$ ).

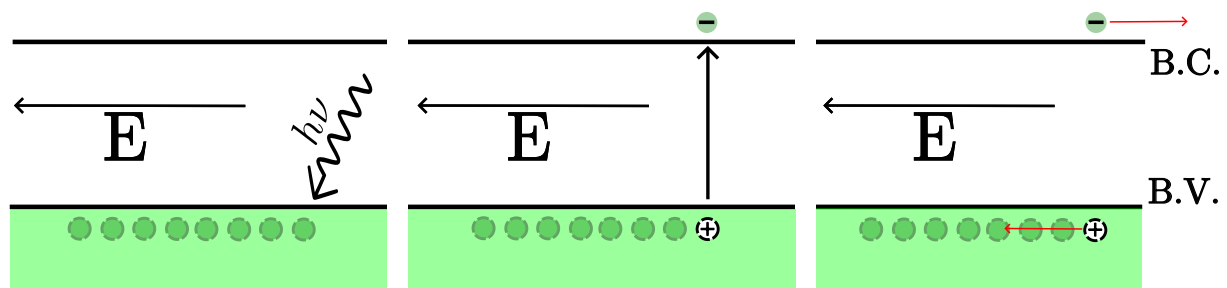


Figura 1.3: Proceso de generación par electrón-hueco.

Para esclarecer esta idea, en la siguiente sección se hará un procedimiento lógico de diferentes casuísticas que nos permitirán deducir la característica I-V del fotodiodo para luego ahondar en las ecuaciones con el fin de obtener un modelo del fotodiodo en el cual se fundamentará este trabajo [10],[11],[12],[13],[14].

#### 1.2.2.1. Análisis Cualitativo del fotodiodo. Dedución de su característica I-V

##### 1. Casuística 1: Fotodiodo en circuito abierto.

Pensemos primero en no conectar a ningún dispositivo nuestro fotodiodo. Los pares electrón-hueco irán acumulándose a ambos extremos del dispositivo (no hay circuito por el que puedan avanzar), dado que tienen carga opuesta, poco a poco se irá

formando un potencial entre ambos extremos del dispositivo. Este potencial no puede acumularse de manera infinita, pues, llegará un momento en que habrá tal cantidad de carga acumulada en cada extremo que cuando llegue otro portador no podrá acumularse ya que será repelido, en consecuencia, volverá hacia la región de depleción, donde se creó, y por el camino se recombinará. Notar, que este voltaje máximo acumulable, no deberá tener teóricamente una dependencia muy fuerte con la cantidad de luz incidente (luego demostraremos que dicha dependencia es logarítmica), puesto que si se generan más pares electrón-hueco serán repelidos de igual manera que si fueran pocos, en cambio, sí que depende de la longitud de nuestro dispositivo, es decir, diodos de base larga serán capaces de obtener un voltaje mayor que aquellos de base corta (a mayor longitud más carga acumulable).

Como conclusión, tendremos en el dispositivo una corriente nula, pero un voltaje máximo conseguido el cual denominamos  $V_{oc}$ .

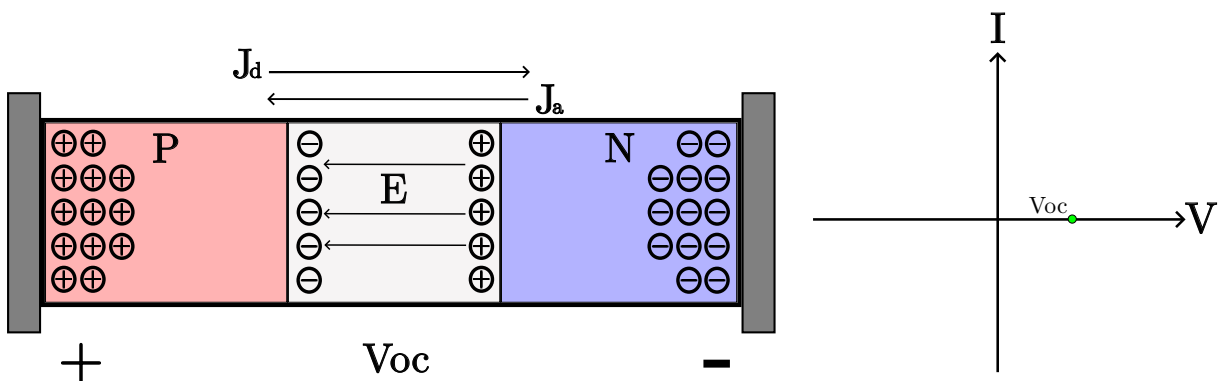


Figura 1.4: Fotodiodo en circuito abierto. Característica I-V.

## 2. Casuística 2: Fotodiodo en cortocircuito.

Pensemos ahora en la situación inversa, conectamos los extremos del fotodiodo a un cable de resistencia nula, es decir, un corto. Ahora la carga no podrá acumularse a ambos extremos del fotodiodo pues avanzará por el cable. Esto provocará una corriente de la región N a la región P, una corriente negativa (la ya descrita fotocorriente generada). Esta corriente se espera que si tenga una fuerte dependencia con la cantidad de luz incidente, puesto que a mayor incidencia lumínica mayor cantidad de pares electrón-hueco se generan y por tanto mayor corriente se produce.

Como conclusión, tendremos en el dispositivo un voltaje nulo, pero una corriente la cual es mayor en función de la cantidad de luz incidente, denominamos esta corriente como la corriente en circuito cerrado ( $I_{sc}$ ). Esta, es la composición de dos corrientes, la ya denominada fotocorriente generada ( $I_{ph}$ ) y la corriente térmica ( $I_{th}$ ), que se produce debido a que la propia agitación térmica es capaz de provocar pares electrón-hueco que seamos capaces de recolectar.

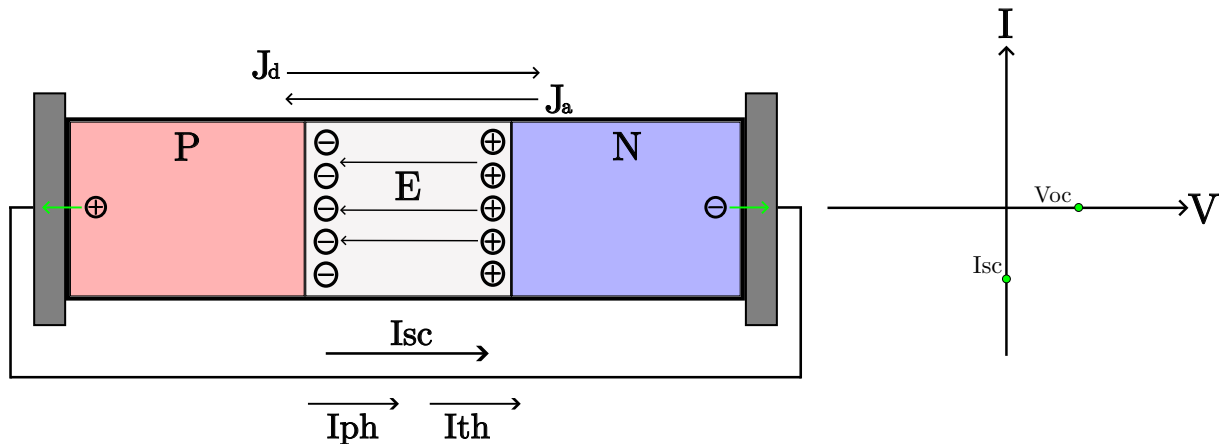


Figura 1.5: Fotodiodo en circuito cerrado. Característica I-V.

### 3. Casuística 3: Fotodiodo conectado a una resistencia.

Supongamos ahora que colocamos una resistencia de pequeño valor nominal (la cual podría ser típicamente un sensor o circuito) conectada al dispositivo. Para que siga habiendo corriente, se deberá de crear una diferencia de potencial en los extremos del dispositivo, la necesaria para que los portadores atraviesen la resistencia, lo que provocará que se acumule cierta carga y hará que la corriente disminuya, pues algunos portadores serán repelidos. Conforme vamos aumentando la resistencia, cada vez se acumula más carga y más portadores serán repelidos, lo que hará que disminuya aún más la corriente y aumente más el voltaje en el dispositivo. Llegando a la curva I-V mostrada en la Figura 1.6.

### 4. Característica I-V completa.

Como hemos deducido, observamos que el fotodiodo en esta configuración trabaja en el cuarto cuadrante de la característica I-V. Esta región de trabajo se conoce como célula solar, puesto que es la única región donde podemos obtener potencia

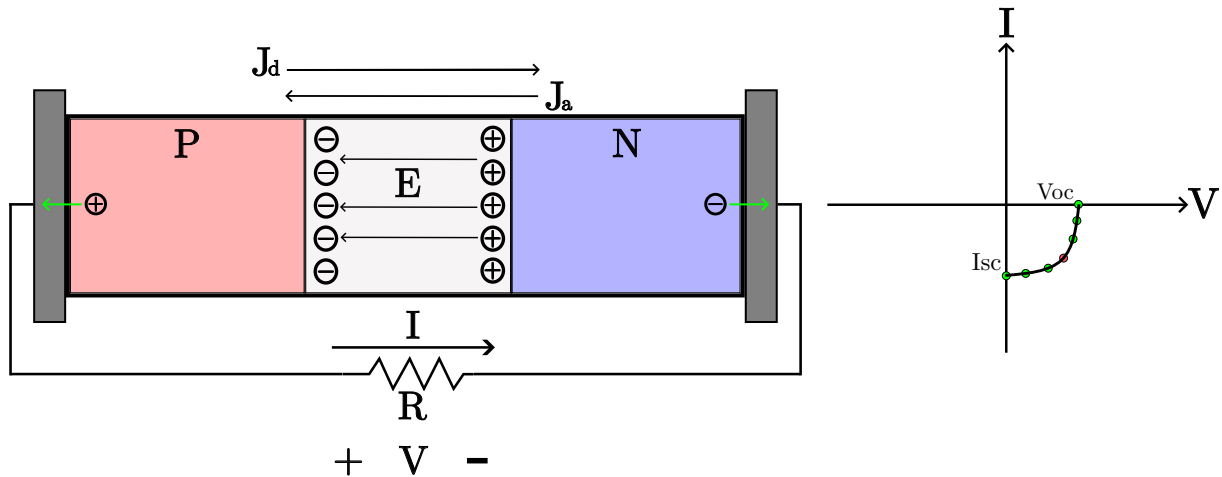


Figura 1.6: Fotodiodo conectado a resistencia. Característica I-V.

del dispositivo, ya que la corriente es negativa y el voltaje positivo, lo que nos lleva a una potencia negativa ( $P = V \cdot I$ ). Notar, en la Figura 1.6 el punto rojo de la característica I-V, que corresponde al punto óptimo de funcionamiento de nuestro diodo, pues este entregaría la máxima potencia.

Supongamos ahora que queremos ir hacia la izquierda en nuestra curva I-V. Debemos conseguir un voltaje negativo sobre nuestro dispositivo, cosa imposible de conseguir si no es utilizando una fuente de tensión externa, debido a la naturaleza de como adquiere voltaje gracias a la luz el fotodiodo. Una vez conectamos el fotodiodo a una fuente de tensión externa, observamos gracias a la Ecuación 1.1 que el término  $V_{bi}$  aumenta, con lo que aumenta la anchura de la región de deplexión. Consecuentemente, la corriente obtenida seguirá teniendo una absoluta dependencia de la cantidad de luz incidente, solo, que conforme mayor sea la tensión que apliquemos al fotodiodo más pares electrón-hueco seremos capaces de obtener y por tanto una corriente mayor. Notar que la región de deplexión no varía demasiado su tamaño (es un efecto de segundo orden), por eso la pendiente de la recta de la intensidad no es muy acusada (ver Figura 1.7).

Para obtener la característica a partir del punto  $V_{oc}$ , necesitaremos una corriente positiva, imposible de conseguir si no es polarizando con una fuente de tensión el dispositivo (recordemos que la corriente generada por si mismo del fotodiodo va siempre de la región N a la P, es negativa). Ahora, la anchura de la región



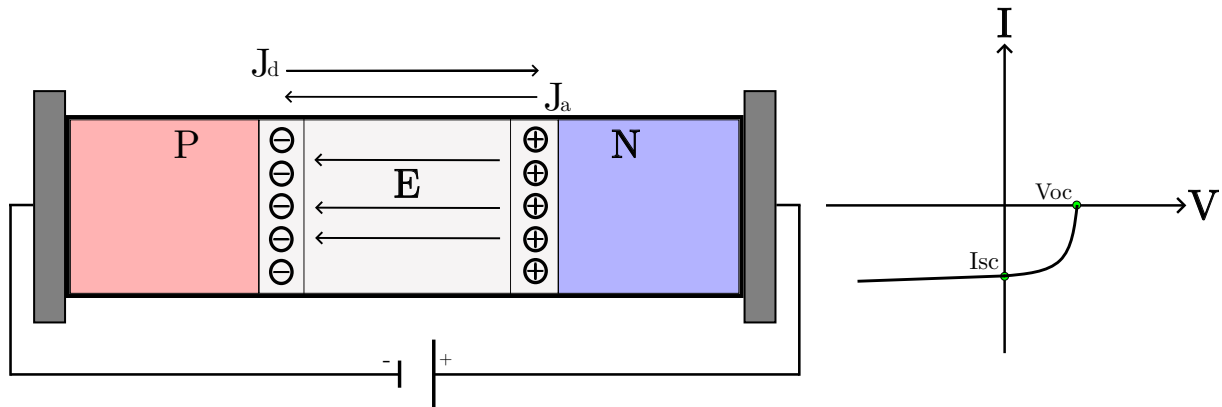


Figura 1.7: Fotodiodo con polarización en reversa. Característica I-V.

de deplexión disminuye y también, se provoca un aumento de la concentración de portadores a los extremos de dicha zona, esto, hace que la corriente de difusión domine. La concentración de portadores tiene una dependencia exponencial con la tensión, con lo que la característica I-V completa es la mostrada en la Figura 1.8.

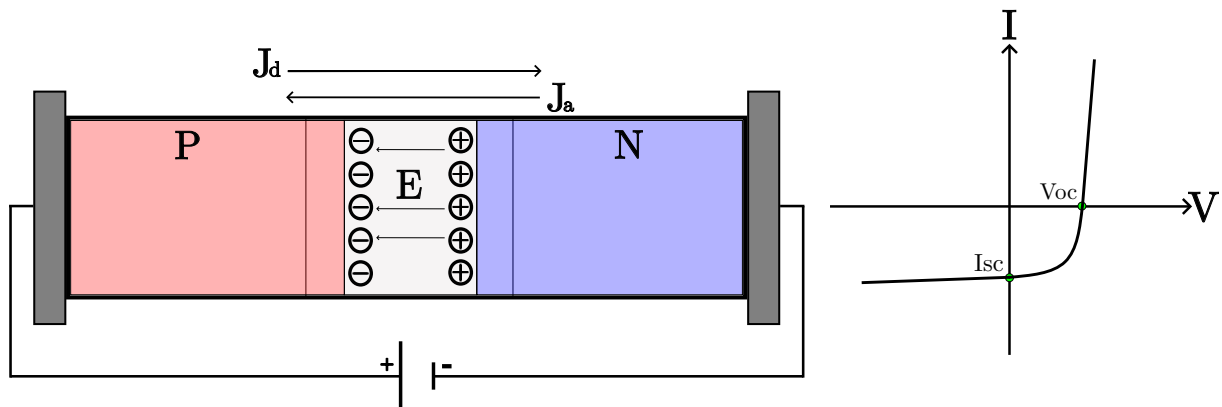


Figura 1.8: Fotodiodo con polarización en directa. Característica I-V completa.

### 1.2.2.2. Análisis Cuantitativo del fotodiodo. Ecuaciones de modelado. Modelo circuital

Con el fin de obtener unas ecuaciones que nos permitan modelar el funcionamiento del fotodiodo, debemos conocer la ecuación que rige la corriente que atraviesa un diodo. Esta es la Ecuación 1.2, la ecuación de Shockley [10].

$$I_F = I_s(e^{\frac{V}{nU_T}} - 1) \quad (1.2)$$

Donde el subíndice “F” indica “Forward”, es decir, corriente “hacia adelante” (de la región P a la N),  $I_s$  es la Corriente Específica del Diodo,  $V$  la tensión a la cual está sometido el diodo,  $n$  un factor de calidad cuyo valor ronda 1-2 y depende del semiconductor utilizado (aproximadamente 2 para el Silicio),  $U_T$  es la tensión térmica que cumple la ecuación:  $U_T = \frac{k_B T}{e} \simeq 26mV$  ( $T = 300K$ ).

La Corriente Específica del Diodo nos aparecerá con frecuencia a la hora de analizar fotodiodos, esta viene dada por la Ecuación 1.3 [15].

$$I_s = qA \left( \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{n_i^2}{N_A}} \right) \quad (1.3)$$

Donde  $A$  es el área del diodo,  $n_i$  es la concentración de portadores intrínsecos del material semiconductor,  $D_p$  y  $D_n$  son los coeficientes de difusión de huecos y electrones respectivamente,  $\tau_p$  y  $\tau_n$  son los tiempos de vida media de huecos y electrones y por último,  $N_D$  es la concentración del dopado en la región N y  $N_A$  la concentración del dopado en la región P.

Podemos distinguir dos comportamientos muy distintos de la corriente que atraviesa un diodo en función del voltaje aplicado:

- $V > 0 \rightarrow I_F \approx I_s e^{\frac{V}{nU_T}}$ . Corriente con una dependencia exponencial de la tensión.
- $V \leq 0 \rightarrow I_F \approx -I_s$ . Corriente negativa de pequeño valor nominal.

Si graficamos la Ecuación 1.2, obtenemos la Figura 1.9. Como podemos observar, la característica I-V obtenida de manera lógica para nuestro fotodiodo coincide con la obtenida a través de la ecuación de Shockley si desplazamos esta última una cierta cantidad sobre el eje de la intensidad.

Físicamente, lo que ocurre es que cuando un diodo se ilumina, la Corriente Específica del diodo deja de dominar la corriente “hacia atrás” del fotodiodo. La nueva corriente que domina en esta dirección es la corriente provocada por la iluminación, es decir, la fotocorriente generada ( $I_{ph}$ ).

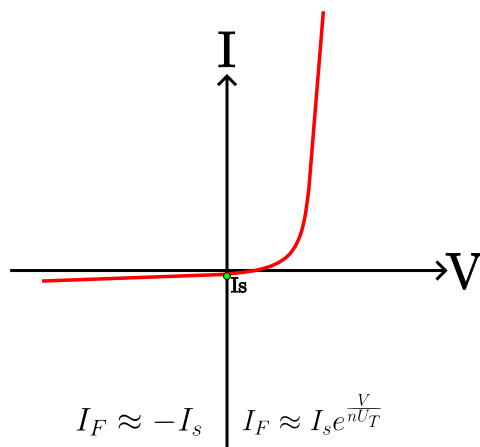


Figura 1.9: Curva I-V del diodo.

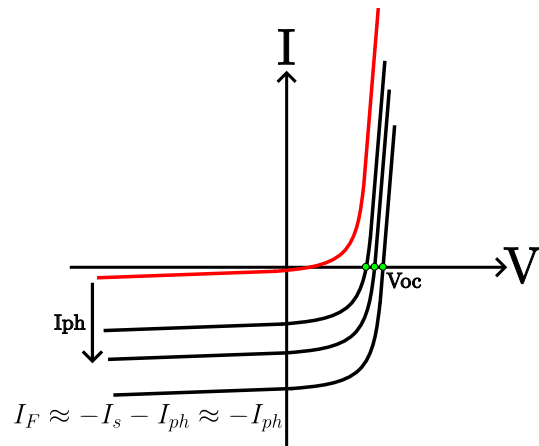


Figura 1.10: Curva I-V del fotodiodo en función de la fotocorriente generada.

Con todo lo obtenido hasta ahora, podemos construir la ecuación que nos va a permitir operar con fotodiodos. Para ello, dividimos la corriente total del fotodiodo en dos partes, la corriente “hacia atrás”, y la corriente “hacia adelante”, obteniendo la Ecuación 1.4.

$$I = -I_{ph} + I_s(e^{\frac{V}{nU_T}} - 1) \quad (1.4)$$

Circuitalmente, se puede expresar el fotodiodo como lo mostrado en la Figura 1.11. Donde la correspondencia de los elementos de circuito es inmediata. Una fuente de intensidad, controlada por la intensidad lumínica, que da cuenta de la fotocorriente generada ( $I_{ph}$ ). Un diodo, el cual se comporta según la ecuación de Shockley y nos aporta la dependencia exponencial de la intensidad con el voltaje y por último, una carga. En este trabajo dicha carga será un condensador, ya que este se irá cargando y acumulando diferencia de potencial a la misma vez que el fotodiodo, cuando el fotodiodo llegue a su voltaje máximo acumulable ( $V_{oc}$ ) el condensador llegará en el mismo momento y la corriente que sale del fotodiodo será cero, habiendo conseguido acumular en el condensador un voltaje que se podrá utilizar en otro dispositivo.

Se puede utilizar un equivalente circuital más preciso si introducimos una resistencia en serie en el camino entre el diodo y la carga, pues daría cuenta de que los portadores deben de atravesar una región donde pueden perderse hasta llegar a los contactos metálicos donde son recolectados (los electrones deben superar la zona N y los huecos la zona P) [16].

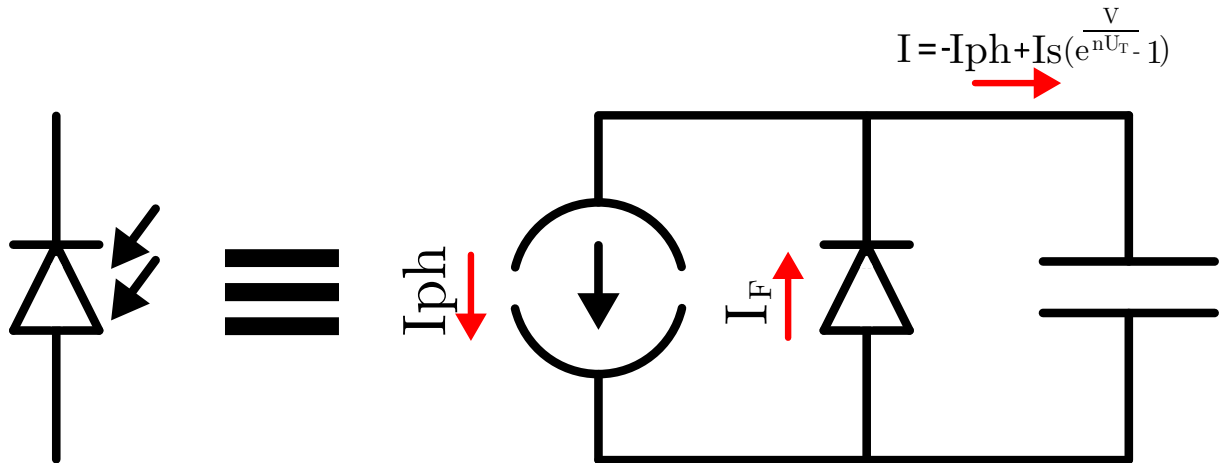


Figura 1.11: Equivalente circuital del fotodiodo.

### 1.2.3. Fabricación física de un fotodiodo integrado en tecnología CMOS

Para la comprensión de diferentes esquemas de secciones transversales de fotodiodos que se verán más adelante, es necesario conocer como se fabrican estos dispositivos en tecnología CMOS [17].

La fabricación de dispositivos en tecnología CMOS sigue una estructura monolítica, donde se parte de un material base, una oblea de silicio (que denominaremos sustrato a partir de ahora) donde se van insertando capas de material con distintos dopados y profundidades.

Se parte calentando la oblea en una atmósfera de oxígeno (oxidación térmica), con el fin de formar  $SiO_2$  en la superficie, capa que nos servirá luego de protección. Sobre esta capa se añade un polímero, en el cual se graban las ubicaciones de dispositivos e interconexiones gracias a técnicas fotográficas y luz violeta.

Acto seguido, mediante el Etching, sobre las grabaciones provocadas por el paso anterior, se consigue eliminar el  $SiO_2$  protector en dichas zonas, dejando la oblea descubierta. Luego, se retira el polímero.

Una vez disponemos de la zona donde trabajar y bien protegida, mediante implantación iónica, se bombardea el sustrato con átomos ionizados del dopado que necesitamos. Esto nos permite conseguir un dopado superficial en dicha zona, es el  $SiO_2$  el encargado de

proteger el sustrato donde no queremos dicha implantación.

Por último, para el caso que nos concierne, dado que necesitamos crear pozos a bastante profundidad para la realización de los fotodiodos es necesario hacer una difusión. Mediante este proceso se calienta la oblea a altas temperaturas (1000 °C) durante un largo periodo de tiempo (sobre una hora), lo que permite que las impurezas penetren más en el sustrato. Es la repetición de todos los pasos ya citados lo que nos permite fabricar estructuras de numerosas formas y tamaños distintos.

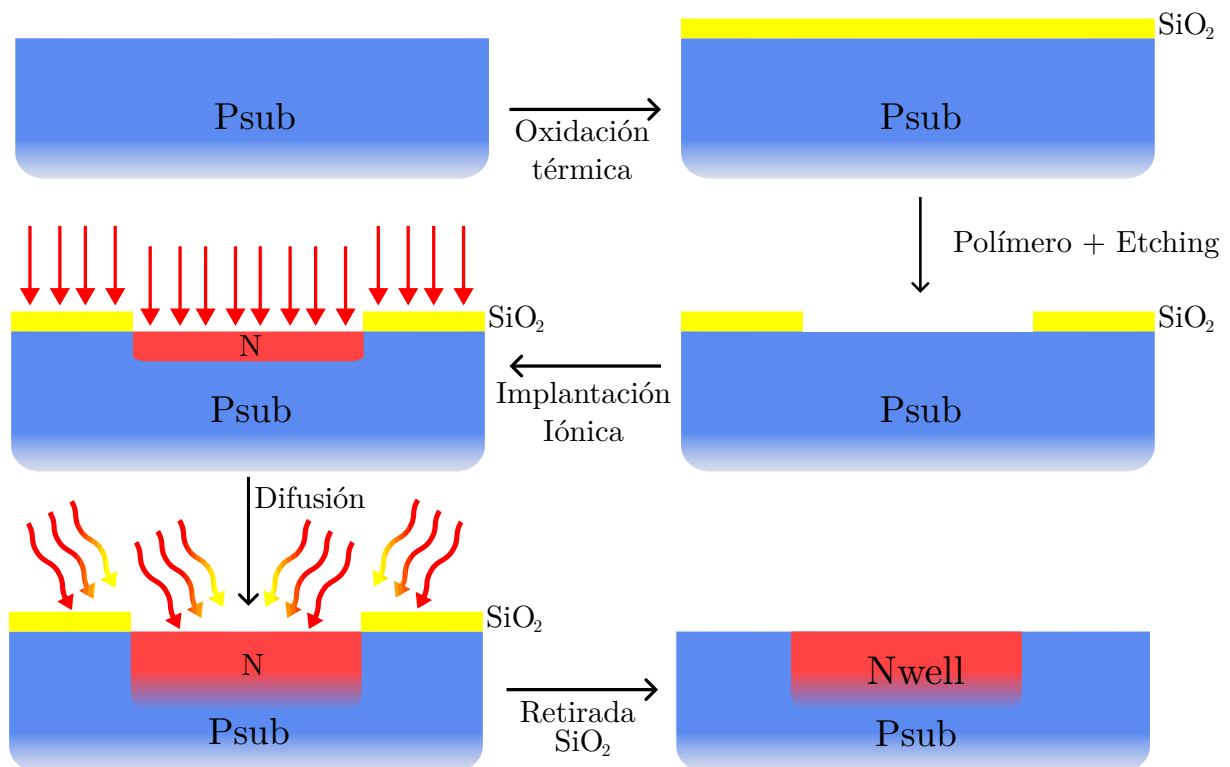


Figura 1.12: Construcción de un pozo NWell.

Notar, como en la Figura 1.12 el degradado en las uniones entre pozos da cuenta de como la difusión no es abrupta, y tiende a disminuir la concentración del dopado al aumentar la profundidad.

### 1.2.4. Dependencia de la fotocorriente generada de parámetros físicos

La fotocorriente generada ( $I_{ph}$ ) es un parámetro de diseño importante a la hora de diseñar fotodiodos, pero este tiene una alta dependencia de la tecnología. En este apartado se tratarán dichas dependencias [18], con el fin de proporcionar una base teórica que nos permita entender porque ciertos fotodiodos funcionan mejor o peor que otros. Además, estas dependencias son fundamentales, pues tenerlas en cuenta nos ayudará a la hora de buscar la máxima eficiencia a la hora del diseño.

#### 1.2.4.1. Energía incidente

El primer parámetro a tener en cuenta es la energía del fotón incidente. Como se ha tratado con anterioridad, dicha energía debe ser suficiente como para hacer promocionar un electrón de la capa de valencia a la de conducción. Recordemos que la energía de un fotón viene dada por la Ecuación 1.5. Donde  $h$  es la constante de Planck,  $c$  la velocidad de la luz y  $\lambda$  la longitud de onda del fotón incidente.

$$E_{\gamma} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.5)$$

En el caso del silicio, el bandgap (distancia energética entre la banda de valencia y conducción) tiene un valor de  $E_g = 1,12 \text{ eV}$ . Con lo cual mediante un cálculo sencillo a través de la Ecuación 1.5 podemos ver la longitud de onda necesaria para superar este bandgap, lo cual nos resulta una longitud de onda de  $\lambda \approx 1107 \text{ nm}$ . Recordemos que la luz visible se encuentra entre longitudes de onda de 400-750 nm, con lo que nuestro dispositivo es sensible a dicha luz y al infrarrojo cercano. En el caso de las células solares se explota esta característica, pues se construye una estructura monolítica de diferentes materiales con distintos bandgaps, con el fin de recolectar fotones de un amplio rango de longitudes de onda. En la Figura 1.13 se muestra una tabla donde se representan los bandgaps y longitudes de onda recolectables para distintos materiales semiconductores compuestos, desde agrupaciones de 4 elementos hasta semiconductores puros como nuestro caso, el silicio [19].

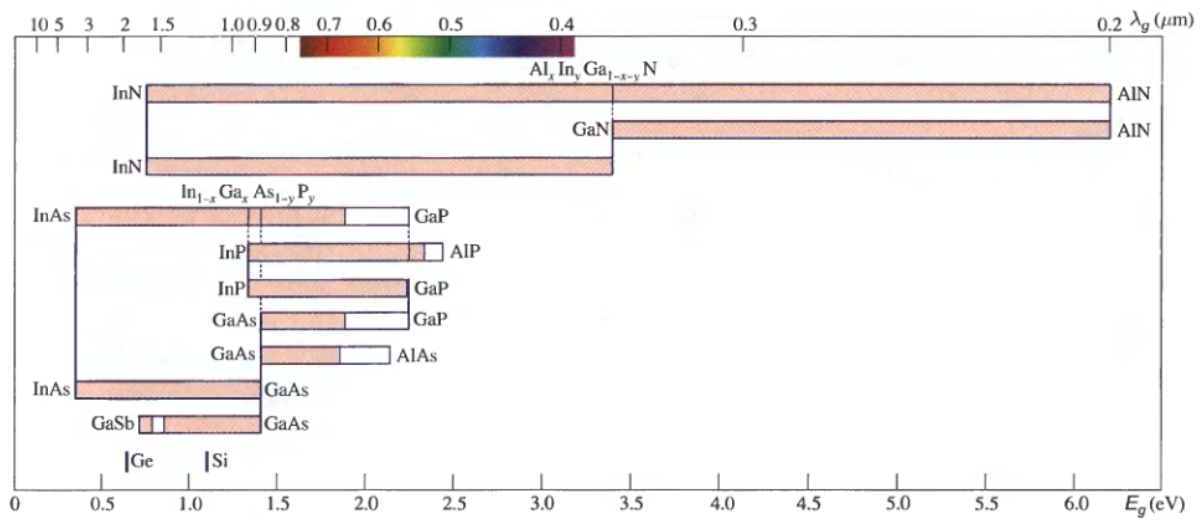


Figura 1.13: Tabla de bandgaps y longitudes de onda recolectables para distintos semiconductores.

Aquellos fotones que lleguen con una energía inferior al bandgap, serán absorbidos en la superficie, asimismo, los que lleguen con una energía muy superior, dada su corta longitud de onda serán también absorbidos cerca de la superficie donde provocarán un par electrón-hueco que se recombinará rápidamente (recordemos que lo ideal es que se absorban en la región de depleción, la cual está a cierta profundidad [16], [20]).

### 1.2.4.2. Interacción Luz-Materia

Cuando la luz incide sobre nuestro dispositivo no toda es absorbida por el mismo, ya que nuestro dispositivo está formado por diferentes capas de material cuyas interfaces y composiciones afectan a la luz incidente.

La primera interfaz que ha de superar la luz, es la interfaz óxido/aire, interfaz que puede provocar que cierta cantidad de luz se refleje. Esta pérdida se llama la pérdida de Fresnel [21], la cual viene definida por el coeficiente de reflexión:

$$\Gamma = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (1.6)$$

Donde  $n_2$  y  $n_1$  son los índices de refracción del aire y del semiconductor respectivamente. Por ejemplo, para el silicio ( $n_1 \approx 4$ ), se obtendría  $\Gamma \approx 0,36$  lo que implica que un 36 por

ciento de la luz incidente será reflejada.

Conforme esta luz se adentra en las diferentes capas, posibles imperfecciones en el material y la no completa transparencia del mismo pueden provocar que haya absorción fuera de la región de deplexión, aumentando las pérdidas. Por último, no toda la luz que llegue a la profundidad de la región de deplexión será absorbida, alguna de esta atravesará dicha región sin provocar pares electrón-hueco que podamos recolectar. Todos estos procesos están representados en la Figura 1.14. [18]

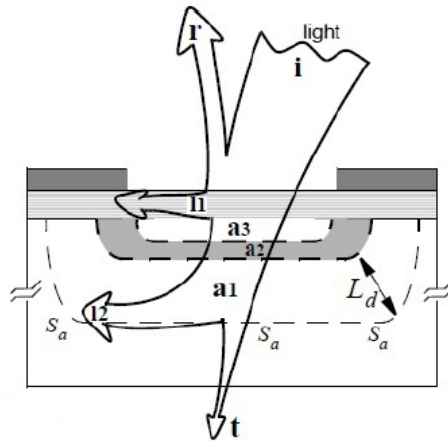


Figura 1.14: Diferentes procesos de absorción en un dispositivo.

Donde “r” simboliza la luz reflejada, “I1” es la luz absorbida en el dispositivo y “t” la que lo atraviesa sin provocar pares-electrón hueco.

### 1.2.4.3. Absorción luminica en el silicio

Para cuantificar la luz absorbida en el dispositivo, hay que conocer que la potencia lumínica incidente se ve atenuada de manera exponencial conforme penetra en el material, siguiendo la Ecuación 1.7. Esta ecuación nos permite conocer cuan lejos es capaz de llegar nuestro fotón sin ser absorbido [22], [23].

$$\rho(x) = \rho_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1.7)$$

Donde  $\rho_0$  es la potencia incidente por unidad de área,  $x$  la profundidad y  $\alpha$  lo definimos como el coeficiente de absorción. El coeficiente de absorción  $\alpha$  depende de la longitud de



onda incidente, consecuentemente, longitudes de onda cortas serán absorbidas más superficialmente y longitudes de onda largas más profundamente, lo que hará que fotodiodos cuya región de deplexión esté más profunda serán más sensibles a longitudes de onda largas y viceversa para los fotodiodos con regiones de deplexión más superficiales.

Esto está representado en la Figura 1.14, donde “I2” representa los fotones con longitudes de onda demasiado cortas o largas, que generan pares electrón-hueco lejos de la zona de deplexión y se pierden. “a1, a2, a3” representan los pares electrón-hueco generados cerca de la región de deplexión (marcada en gris en la figura). Podríamos creer que “a1 y a3” son pares no recolectados, pues no están generados en la región de deplexión, esto no tiene porque ser así y se verá en el siguiente punto.

#### 1.2.4.4. Longitud de difusión y tiempo de recombinación

La longitud de difusión  $L_{e,h}$  representa la distancia media que puede avanzar un electrón sin recombinarse. A su misma vez el tiempo de recombinación ( $\tau_{e,h}$ ) establece cuanto tarda un portador en movimiento en desexcitarse, volviendo a la banda de valencia. Este último, depende de la calidad del silicio y de la densidad de dopado del mismo, siendo evidentemente más conveniente que su valor sea alto, pues habrá más posibilidad de recolectarlo. En la mayoría de veces, la recombinación en el silicio no se da por desexcitación directa, sino que la recombinación indirecta en una impureza de los dopantes es más común. Es por esto que los pares electrón-hueco generados en zonas con alta densidad de dopado (lejos de la zona de deplexión) son rápidamente recombinados.

En cuanto a longitud de difusión, tiene una alta dependencia con el dopado y la temperatura, puede tener valores típicos de cientos de micrómetros en la tecnología CMOS [24]. Dado que la anchura de la zona de deplexión es bastante reducida, hay también aporte a la fotocorriente generada ( $I_{ph}$ ) por parte de pares electrón-hueco generados fuera de la zona de deplexión que se consiguen difundir hasta dicha zona. No obstante, la eficiencia en la recolección de pares generados fuera de la zona de deplexión, tiene una dependencia del tipo exponencial con la distancia a la misma (mientras que la eficiencia de recolección de los generados en la zona de deplexión es del 100 % [25]). Ahora si, en la Figura 1.14 los pares generados fuera de la zona de deplexión “a1 y a3” realmente si contribuyen a  $I_{ph}$ .

### 1.2.4.5. Eficiencia Cuántica

Podemos definir la eficiencia cuántica de un dispositivo como el ratio entre el número de fotones incidentes frente a los que realmente recolectamos [21], [23].

$$\Delta n = \eta(\lambda) \cdot \Delta ph \quad (1.8)$$

Donde  $\Delta n$  es la cantidad de fotones recolectados,  $\Delta ph$  los incidentes totales y  $\eta(\lambda)$  la eficiencia cuántica, que tiene una alta dependencia con la tecnología y la longitud de onda incidente. Este, es un parámetro muy difícil de modelar y de dar unas ecuaciones que lo rijan, suele ser determinado experimentalmente, no obstante, podemos intentar calcular una expresión para  $I_{ph}$  con lo obtenido hasta ahora.

### 1.2.4.6. Expresión de $I_{ph}$

Podemos estimar el número total de fotones que llegan a nuestro dispositivo como:

$$\Delta ph = \frac{A \cdot \rho_0 \cdot \Delta T}{(h \cdot c)/\lambda} \quad (1.9)$$

Donde  $A$  es el área del dispositivo y  $\Delta T$  el tiempo que ha estado expuesto a la luz. Combinando 1.8 y 1.9 llegamos a que:

$$\Delta n = \frac{A \cdot \rho_0 \cdot \Delta T}{(h \cdot c)/\lambda} \cdot \eta(\lambda) = \frac{A \cdot \rho_0 \cdot \Delta T}{(h \cdot c)} \cdot \xi(\lambda) \quad (1.10)$$

Donde  $\xi(\lambda)$  es una función altamente dependiente de la longitud de onda. Asumiendo que cada fotón absorbido contribuye con un par electrón-hueco, podemos calcular la carga total obtenida en un intervalo de tiempo  $\Delta T$  como sigue:

$$Q_{ph} = e \cdot \Delta n = \frac{A \cdot \rho_0 \cdot \Delta T}{(h \cdot c)} \cdot \xi(\lambda) \cdot e \quad (1.11)$$

Ahora pues, la expresión fotocorriente generada es inmediata:

$$I_{ph} = \frac{Q_{ph}}{\Delta T} = \frac{A \cdot \rho_0}{(h \cdot c)} \cdot \xi(\lambda) \cdot e \quad (1.12)$$

Notar, la dependencia lineal de la fotocorriente generada con el área del dispositivo, tal y como se esperaba, y con la potencia total incidente.

#### 1.2.4.7. Dark Current

Para concluir, conviene tener en cuenta que existe una corriente inversa que atraviesa el fotodiodo cuando este está sin iluminar. Esta corriente es la “Dark current” y nos limita la mínima fotocorriente generada que podemos medir. Depende del dopado del fotodiodo y de la temperatura, viene dado por la Expresión [26]:

$$I_{dark} = \frac{A \cdot e \cdot n_i \cdot W}{2 \cdot \tau_0} \quad (1.13)$$

Con  $W$  la anchura de la región de depleción,  $A$  el área del fotodiodo y  $\tau_0$  el tiempo efectivo de recombinación de los portadores minoritarios, este último es la suma del ratio de cada una de las recombinaciones que puede sufrir un portador en el silicio.

#### 1.2.5. Búffer de Medición

Dado que el objetivo de este trabajo es la medición de las distintas tensiones de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de varios fotodiodos y estructuras de test, necesitamos una estructura capaz de ayudarnos a realizar dichas medidas.

Para ello, utilizaremos un búffer o seguidor de tensión, de arquitectura Folded cascode (Figura 1.15b), conectado a la salida del objeto a estudio. Este, es esencialmente un amplificador con ganancia unidad, es decir, dado que la tensión de salida es la de entrada pero multiplicada por el valor de la ganancia, se obtiene teóricamente el mismo voltaje a la entrada que a la salida. [27]

Podríamos preguntarnos, que sentido tiene utilizar un circuito de este tipo, pues simplemente copia la tensión de entrada. Este circuito es de vital importancia ya que posee una impedancia de entrada muy alta (del orden de  $M\Omega$ , aunque infinita teóricamente) lo que nos asegura que no hay una fuga de corriente en el nodo de salida del fotodiodo [28]. En el caso de que la hubiera (que sería el caso si midiésemos directamente sobre el nodo de salida), sacaríamos a nuestro fotodiodo de su punto de operación, pues recordemos

que se debe de dar que la corriente que atraviesa el fotodiodo sea cero, cosa imposible si existe una fuga al detector. Por otro lado, el búffer también aumentará la potencia de la señal de salida. Así pues, una vez aislado el nodo de salida del fotodiodo y aumentada la potencia de la señal, se podrán realizar las medidas pertinentes en el nodo de salida del búffer.

Se ha realizado una serie de simulaciones para comprobar que el búffer es adecuado para la medida de tensión en fotodiodos. Para ello, se ha excitado con una fuente de tensión variable y se ha conectado a una carga de 10 pF, que simula la carga que tendría una sonda de osciloscopio. El esquemático es el mostrado en la Figura 1.15a.

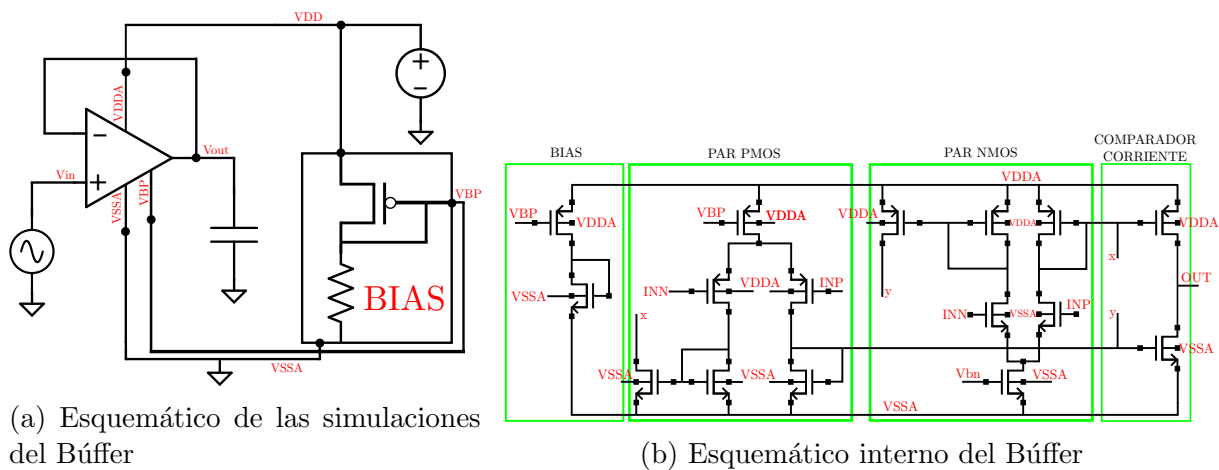
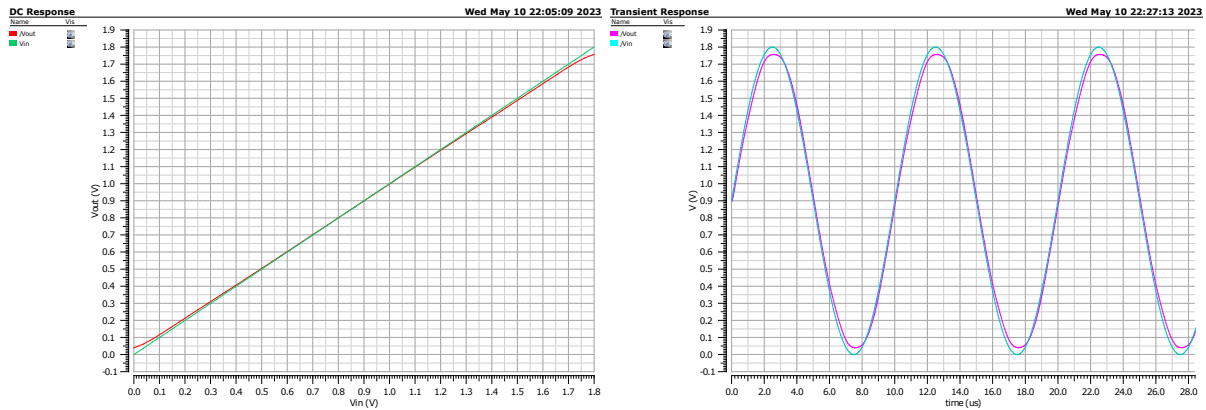


Figura 1.15: Esquemáticos del Búffer de medición

Primero se ha realizado la característica de entrada (Figura 1.16a), realizando un barrido de las posibles tensiones de entrada, de 0 a 1.8V, valor del voltaje de polarización del búffer. Se observa como este comienza a saturar en los valores extremales, sobre valores menores a 50 mV y mayores a 1.75 V, no obstante, no nos debe preocupar esto puesto que nuestros fotodiodos no alcanzarán dichos valores. A su vez, se ha excitado el búffer con una señal sinusoidal de amplitud pico-pico de 1.8V y frecuencia 100 kHz (Figura 1.16b). Se observa como sigue adecuadamente la tensión excepto para los extremos, como cabría esperar. Además, añade un pequeño desfase a la señal prácticamente inapreciable, con lo que podemos concluir que el búffer funciona correctamente.

Por último, en la Figura 1.17 se ha representado el diagrama de Bode del búffer, para comprobar su respuesta respecto a la frecuencia de entrada, donde a su vez se ha marcado la posición del primer polo. Se observa como el búffer disminuye la ganancia



(a) Característica de entrada del Búffer (b) Respuesta Búffer bajo excitación sinusoidal

Figura 1.16: Simulaciones estáticas del búffer

unidad conforme se aumenta la frecuencia e introduce algo de desfase, no obstante, para la radiación solar no se esperan cambios en el voltaje de entrada tan altos (100 kHz por ejemplo corresponde a cambios en la señal de entrada de decenas de microsegundos), con lo cual, se espera una medición correcta del búffer en cuestión.

**Respuesta en AC**

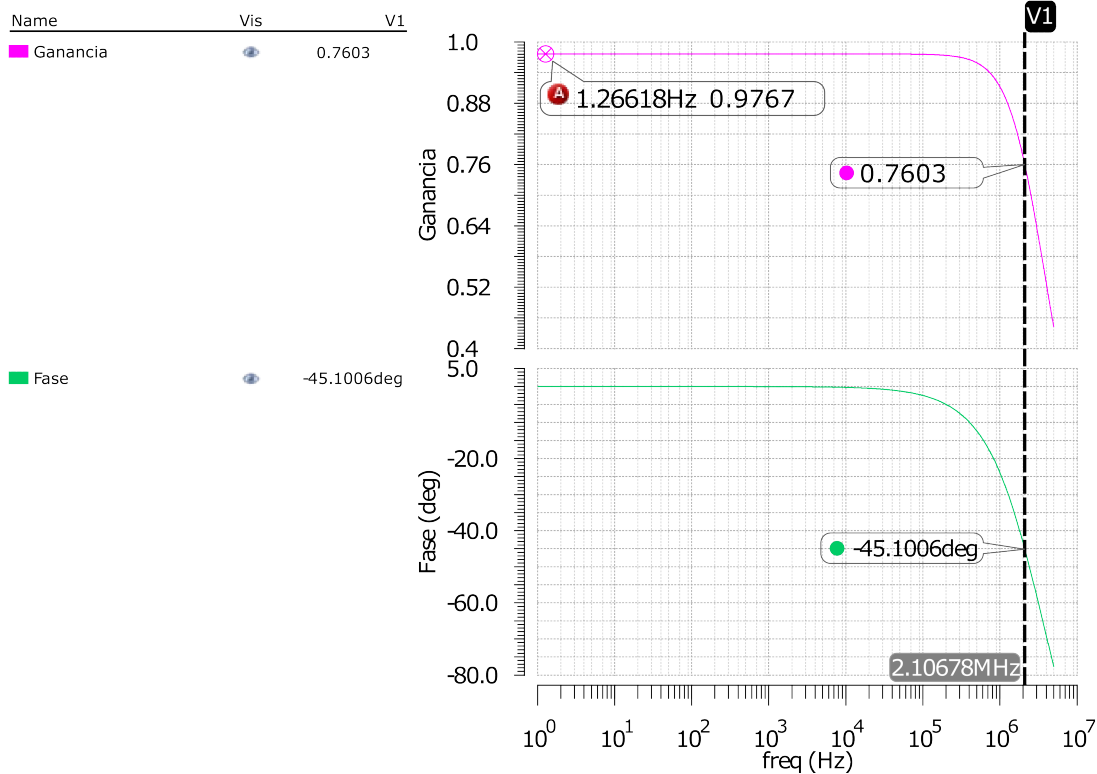


Figura 1.17: Diagrama de Bode del Búffer

Se presenta también en la Figura 1.18 el layout físico de la conexión de dicho búffer a un fotodiodo. Donde, se observa que la conexión es la unión de tres dispositivos distintos. A la izquierda, el fotodiodo a estudio, del cual extraemos en “metal 3” su tensión de circuito abierto y la conectamos al terminal de entrada del búffer, el cual es el gran dispositivo de la derecha. Sobre el fotodiodo se sitúa el circuito encargado de polarizar en corriente al búffer, para garantizar su correcto funcionamiento. Por último, destacar los grandes contactos situados a ambos lados del búffer, estos serán los raíles de polarización del circuito, y debemos de conectar consecuentemente a ellos los terminales adecuados de nuestro fotodiodo y circuito de polarización. A posteriori, se explicarán las diferentes capas que conforman los layouts de los fotodiodos.

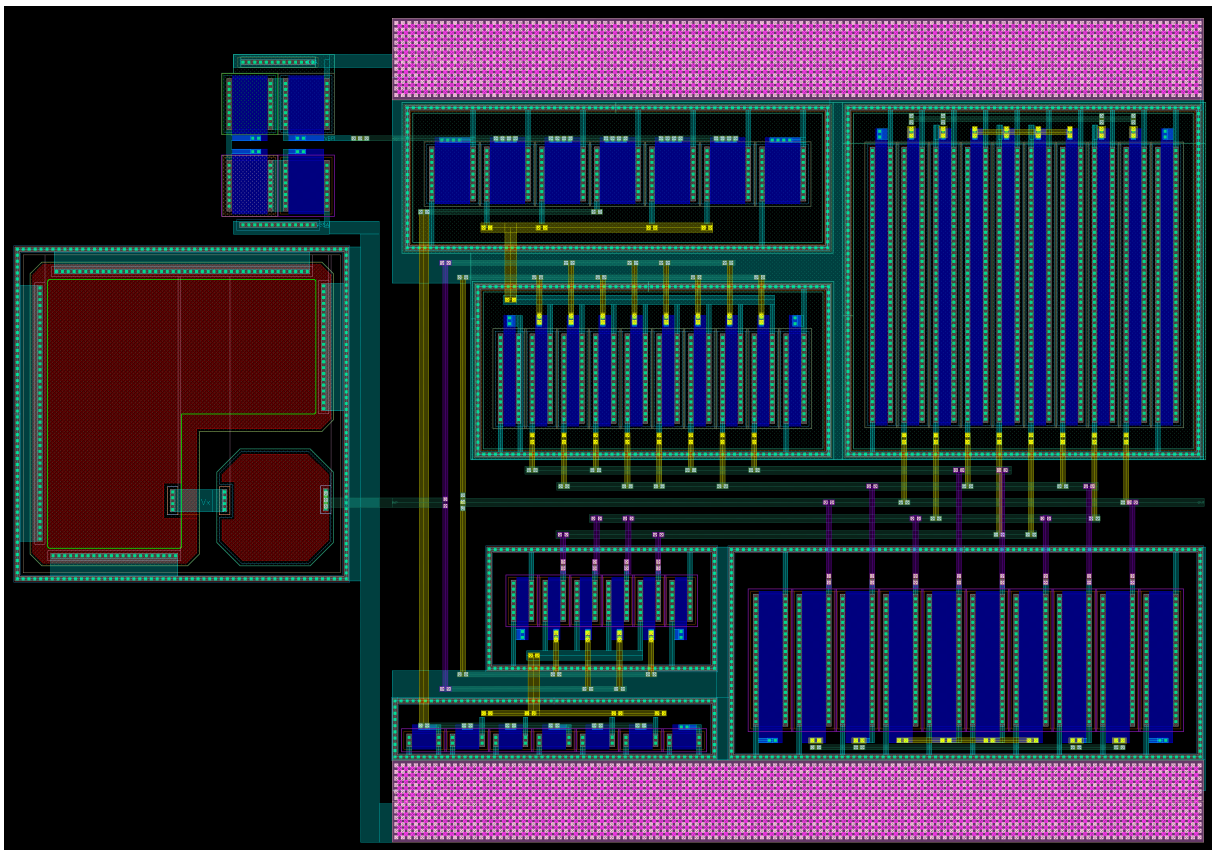


Figura 1.18: Layout de un fotodiodo conectado al Búffer de medición. Área utilizada:  $100 \mu m \times 70 \mu m$ .

### 1.3. Revisión del Estado del Arte

Pese que la alimentación de microdispositivos con fotodiodos parece una solución muy atractiva, esta no está exenta de problemas. Son varios los diseñadores y/o investigadores que hasta la fecha y bajo nuestro conocimiento, han propuesto diseños para solventar dichos problemas [15] [29], en esta sección se ahondará en dichas propuestas para sentar las bases de en qué punto nos encontramos. A su misma vez, se expondrán distintos estudios que nos aportarán información relevante sobre qué fotodiodo funciona mejor y cuáles somos capaces de integrar en nuestra tecnología, en nuestro caso, tecnología CMOS UMC 180 nm.

La principal problemática que los fotodiodos presentan, es que, por lo general, son capaces de alcanzar una tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de unos  $0,3 \sim 0,5 V$ . Recordemos que generalmente, en tecnología CMOS se necesitan voltajes para polarizar los transistores u otros componentes electrónicos del orden de  $0,7 \sim 5 V$ , con lo cual polarizarlos a través de fotodiodos es complejo. Además, para los transistores de esta tecnología los voltajes umbrales se encuentran en torno a medio voltio, con lo que difícilmente podríamos hacerlos trabajar en inversión fuerte, no obstante, los fotodiodos sí se utilizan en el caso de que haya que trabajar en inversión débil. Como último detalle, si consiguiésemos amplificar la tensión de entrada que nos proporcionase el fotodiodo, podríamos encontrar problemas con la variación del voltaje y la introducción de ruido, debido a las fluctuaciones naturales de la propia luz.

Como primera propuesta de mejora, se podría pensar en la conexión de dos fotodiodos en paralelo, esto es lo que se propone en [15], donde se hace un estudio comparativo del funcionamiento de un fotodiodo versus el funcionamiento de dos en paralelo. Se obtienen ciertas mejoras (apoyaremos estas conclusiones con ecuaciones en el siguiente capítulo), tales como una mayor sensibilidad a más longitudes de onda, mayor  $V_{oc}$  para mismos valores de temperatura, mejor latencia (tiempo de respuesta del dispositivo frente a cambio de luminosidad), etcétera. No obstante, la tensión de circuito abierto obtenida no posee una gran mejoría, llegando a conseguir algunos milivoltios extras, esto se observa en los resultados experimentales obtenidos, representados en la Figura 1.19. [15]

Por otro lado, podríamos proponer la conexión en serie de diferentes fotodiodos, esto,

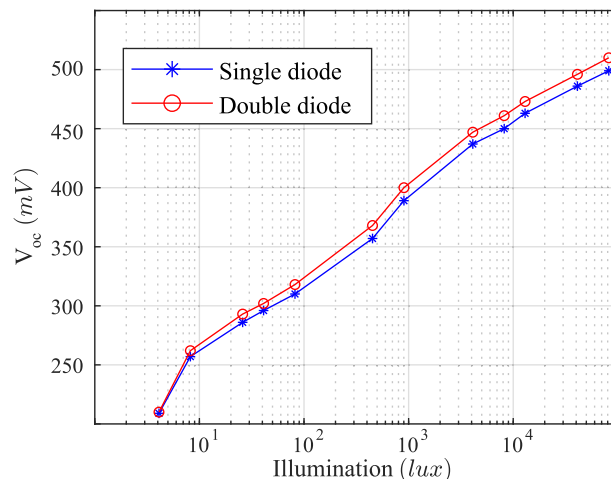


Figura 1.19:  $V_{oc}$  frente a la iluminación, ambos iluminados con luz blanca.

es lo que se propone en [29]. La principal problemática en este caso es, que en tecnología CMOS, los fotodiodos más básicos tales como el NWell/Psub (nótese que el nombre es el orden de las capas de arriba a abajo) tienen uno de sus terminales conectado al sustrato, el cual es el mismo para todas las estructuras con lo que se hace imposible una conexión en serie. No obstante, en tecnologías más avanzadas (como la utilizada en el trabajo de A.Bermak [29] o en este), podemos realizar estructuras de varias capas apiladas. Las tecnologías más avanzadas son capaces de implementar todos los pozos mostrados en la Figura 1.20 [7]. Estas son conocidas como tecnologías Triple Well, no es nuestro caso. No obstante, se explicarán los fotodiodos utilizando dichas capas pues es más ilustrativo y luego se explicará qué capas “sustitutas” podemos utilizar en nuestra tecnología.

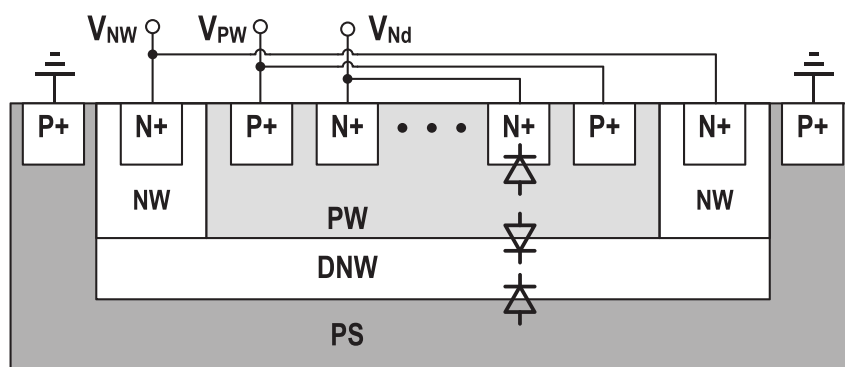


Figura 1.20: Posibles pozos implementables en tecnología Triple Well.

Las siglas marcan el tipo de pozo que es (se explicarán algunas de sus características



en el siguiente capítulo), en concreto, NW y PW hacen referencia al Nwell y el Pwell, DNW para el Deep Nwell y por último Ps que referencia al sustrato.

Observando la cantidad de fotodiodos disponibles, se puede proponer la utilización de algun fotodiodo que tenga algún terminal no conectado al sustrato, como el P+/Nwell, y es lo que propone A.Bermak. Este, llega a resultados muy buenos, ya que su estructura obtiene valores de  $V_{oc}$  múltiplos de 0.4 V, pero, a cambio, necesita utilizar grandes estructuras que consumen mucha área. Estas son utilizadas con el fin de solventar corrientes de fuga provenientes de la idea de aislar los terminales del sustrato a través de otro pozo mayor y más profundo (por ejemplo, en el caso del P+/Nwell el pozo Nwell aísla el fotodiodo del sustrato, pero crea un fotodiodo parásito que drena la corriente en las capas Nwell/Psub).

Se presenta a su misma vez una tabla (Figura 1.21, [7]), donde se ha caracterizado la fotocorriente generada de algunos tipos de fotodiodos para una iluminación de  $1,13 \text{ mW/mm}^2$  y distintas configuraciones.

Parameter	Diode Type			Connection	
	N+/PW	PW/DNW	DNW/PS	Parallel	Stacked
$I_{sc}(\text{pA}/\mu\text{m}^2)$	74.3	69.6	433	577	74.7
$V_{oc}(\text{V})$	0.55	0.527	0.526	0.53	1.05
Max. Eff.(%)	2.8	2.6	16.7	21.9	5.9

Figura 1.21: Tabla de caracterización de distintos fotodiodos en tecnología CMOS.

## 1.4. Objetivos del trabajo

Son varios los parámetros que se pueden tratar de optimizar en el ámbito de estudio de los fotodiodos como bien han conseguido otros diseñadores y/o investigadores. En el presente trabajo se buscará principalmente diferentes configuraciones de fotodiodos que optimicen y maximicen la tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ ), manteniendo siempre el compromiso de intentar realizar una implementación lo más eficiente que nos permita la tecnología e intentando reducir siempre al máximo el área utilizada. Para ello, se proponen diferentes estructuras utilizando conexiones de fotodiodos tanto en paralelo como en serie.

Asimismo, se busca también obtener las ecuaciones que justifiquen las posibles mejoras de estas configuraciones respecto a otras.

Si el objetivo establecido se cumple, se pretende también ofrecer a los diseñadores los layouts físicos de las estructuras propuestas, para que así consideren la opción de añadirlas a sus propios diseños de microchips si estas estructuras cumplen sus requerimientos de voltaje necesitado y área disponible. Ya que, como objetivo a largo plazo, se busca integrar y medir los fotodiodos aquí presentados, puesto que los layouts realizados están ideados para su integración.

# CAPÍTULO 2

## Análisis de fotodiodos bajo estudio

Antes de entrar al estudio de estructuras más complejas, debemos de entender los fotodiodos mas básicos que nuestra tecnología nos permite integrar, pues, estos serán las “piezas” base que utilizaremos a la hora de construir estructuras más complejas. Esta sección trata de esto. Se presenta un estudio de sus secciones transversales de construcción, las ecuaciones que rijen su comportamiento, sus inconvenientes y ventajas, y lo más importante, su layout físico, ya que es lo que acabara traduciéndose en el dispositivo físico.

Utilizaremos distintos tipos de pozos, los mostrados en la Figura 1.20, estos se diferencian en:

- Pozos N+ y P+.

Caracterizados por ser pozos muy superficiales, de poco espesor y altamente dopados. Además, estos se utilizarán en los contactos.

- Pozos Nwell y Pwell.

Pozos algo más profundos, con un dopado bastante inferior a los pozos N+ y P+ (aproximadamente 3 órdenes de magnitud en unidades de  $at/cm^3$ ).

- Pozo DNW.

Pozo muy profundo, con un dopado similar a los pozos Nwell y Pwell, este es capaz de envolver en su interior todos los pozos anteriormente nombrados.

Por otra parte, tanto profundidad de los pozos y su dopado no son variables a la hora del diseño, estos valores están fijados por la tecnología, además, el fabricante no nos proporciona dichos datos. Por último, debemos de respetar a la hora del diseño las reglas establecidas por el fabricante “Design Rule Checking (DRC)”, ya que estas nos dan los límites físicos de si nuestro diseño es fabricable o no.

## 2.1. Nwell/Psub

### 2.1.1. Nwell/Psub: Sección transversal y equivalente circuital

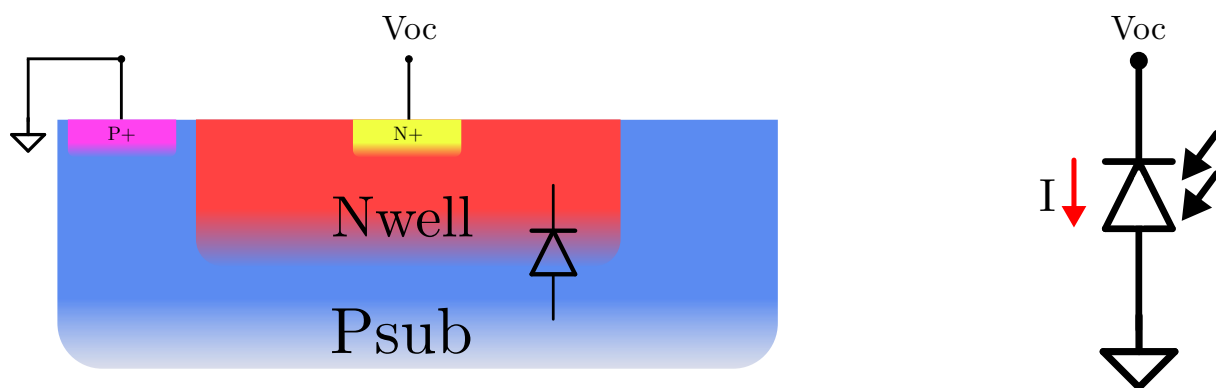


Figura 2.1: Sección transversal y equivalente circuital del fotodiodo Nwell/Psub

Como se observa en la Figura 2.1, la sección transversal de este fotodiodo consiste en un pozo Nwell sobre el propio sustrato. Notar, que, como se ha comentado con anterioridad, los contactos se realizan con pozos N+ y P+.

Respecto al equivalente circuital, hay que tener cuidado pues la corriente está definida positiva de la zona N (Nwell) a la zona P (sustrato) para que así se asemeje a la corriente generada por una batería (donde la corriente dentro de la misma va del polo negativo al positivo). Con lo cual esta corriente viene dada por la Expresión 1.4 pero cambiada de signo:

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V}{nU_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Ahora, con el fin de obtener la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), se ha de imponer la

condición que se dedujo en la sección 1.2.2.1, la cual resultó en que se llegaba a dicha tensión cuando la corriente total que atravesaba el fotodiodo fuese cero, operando:

$$I = I_{ph} - I_s(e^{\frac{V}{nU_T}} - 1) = 0 \rightarrow I_{ph} = I_s(e^{\frac{V_{oc}}{nU_T}} - 1) \rightarrow \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 = e^{\frac{V_{oc}}{nU_T}}$$

$$V_{oc} = nU_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (2.2)$$

Observamos, que se obtiene la dependencia logarítmica ya comentada para  $V_{oc}$  respecto a  $I_{ph}$ . Y, que como tanto  $I_{ph}$  como  $I_s$  dependen del área,  $V_{oc}$  no. Para este primer fotodiodo, vamos a realizar una estimación del cociente  $\frac{I_{ph}}{I_s}$ , ya que es un cociente que aparecerá con bastante frecuencia. Supongamos un fotodiodo NWell/Psub con las siguientes características [13]:

- $A = 100 \mu m^2$
- $D_p = 12,5 \text{ cm}^2/s$
- $D_n = 30 \text{ cm}^2/s$
- $n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ carriers/cm}^3$
- $\tau_p = 10^{-9} \text{ s}$
- $\tau_n = 10^{-6} \text{ s}$
- Dopado Sustrato:  $N_A = 10^{15} \text{ at/cm}^3$
- Dopado Nwell:  $N_D = 10^{17} \text{ at/cm}^3$

Que son valores típicos para un fotodiodo NWell/Psub en tecnología CMOS. Para este tipo de fotodiodos con este área, los valores esperados de  $I_{ph}$  rondan las pocas unidades de pA [15]. Podemos, a través de la ecuación 1.3 obtener la Corriente Específica de este dispositivo ( $I_s$ ), lo que nos resulta  $I_s \approx 8,5 \text{ fA}$ . Con lo cual  $I_{ph}$  es aproximadamente desde 2 a 3 órdenes mayor que  $I_s$ , siempre y cuando las condiciones de iluminación sean favorables. Si continuamos con el cálculo, sustituyendo los valores obtenidos en la Ecuación 2.2 se obtiene una  $V_{oc}$  del orden de los 300 mV, resultado que coincide con lo esperado.

### 2.1.2. Nwell/Psub: Layout Físico

Se ha realizado el layout físico de un fotodiodo cuadrado Nwell/Psub de  $10\mu\text{m}$  de lado.

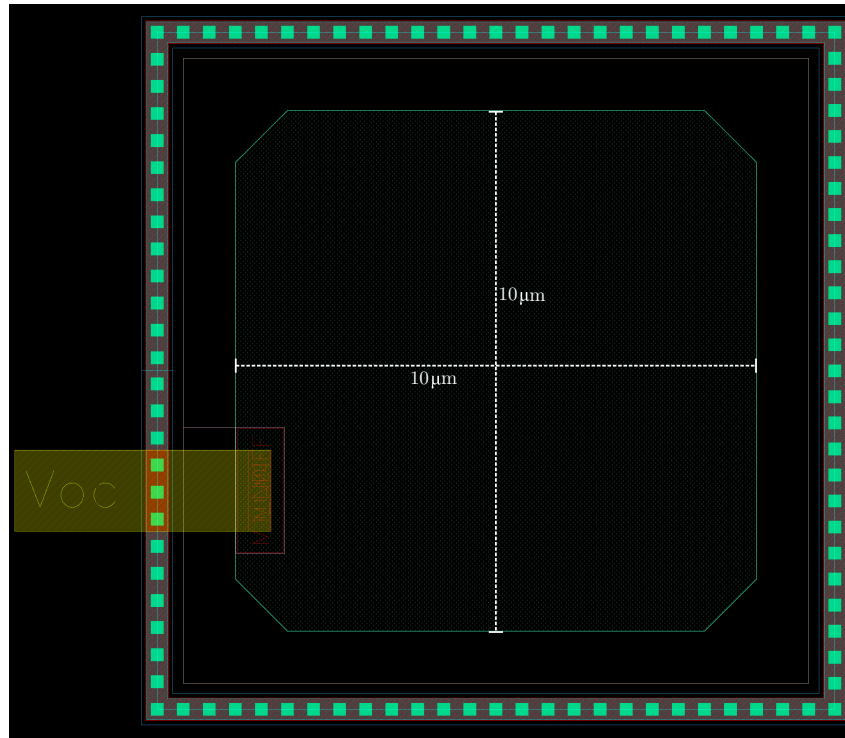


Figura 2.2: Layout Físico del fotodiodo Nwell/Psub

Recalcar que el layout se realiza con una vista cenital del sustrato. Respecto a las capas, el fondo negro hace cuenta del sustrato mientras que la capa verde con pequeñas rayas verdes es el pozo Nwell. Notar las esquinas recortadas del dispositivo, para evitar posibles efectos de borde de los campos eléctricos. Asimismo, la estructura está rodeada por un “cuadrado” de contactos, esto es el anillo de guarda, estructura que aísla el dispositivo de posibles dispositivos cercanos a él dentro del sustrato. El dispositivo también está bajo capas con “purpose dummy blockage”, son las encargadas de indicarle al fabricante que sobre ella no se puede agregar dicho material, así, no se superpondrán a la hora de la fabricación capas de otros materiales opacos, que no nos permitiría recolectar los fotones. Por último se añade una “capa SAB” para indicar al fabricante que no queremos que nos coloque una capa de “salicide” por encima de nuestro diodo, pues esta capa se coloca para reducir la resistividad de los contactos, pero opacaría nuestro fotodiodo, es por esto

que hay que hacerle un recorte encima de los contactos. Por último, la salida de voltaje del fotodiodo está marcada como “ $V_{oc}$ ” en metal 2, puesto que el anillo de guarda es un contacto en metal 1 conectado al sustrato, que a su misma vez está a tierra, con lo que si obtuviésemos el voltaje “ $V_{oc}$ ” con metal 1 estaríamos conectando el pozo NWell a tierra, cosa no deseada.

## 2.2. P+/Nwell/Psub

### 2.2.1. P+/Nwell/Psub: Sección transversal y equivalente circuital

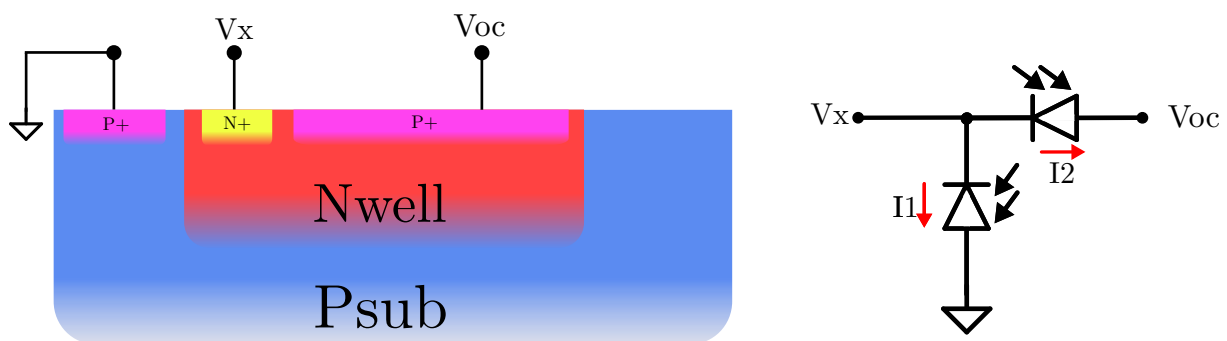


Figura 2.3: Sección transversal y equivalente circuital del fotodiodo P+/Nwell/Psub

Respecto al fotodiodo anterior, observamos que tenemos una capa extra, la P+, que nos forma un fotodiodo entre el pozo Nwell y esta misma. A su misma vez, nos sirve de contacto. Este es el bloque básico utilizado en el trabajo de M. K. Law y A. Bermak [29], donde se hace patente que el fotodiodo formado en la capa P+ tiene ambos terminales libres. En el siguiente capítulo, se estudiarán las ecuaciones relacionadas a esta estructura, tratando las diferentes ventajas que esta estructura proporciona, como por ejemplo conectar el terminal “ $V_x$ ” a tierra para cortocircuitar el fotodiodo entre los pozos Nwell y Psub o la posibilidad de conectar varias de estas estructuras en serie (se podría utilizar el terminal “ $V_{oc}$ ” para conectarlo a un terminal “ $V_x$ ” de otra estructura similar).

### 2.2.2. P+/Nwell/Psub: Layout Físico

Se ha realizado el layout físico de un fotodiodo cuadrado P+/Nwell/Psub donde el fotodiodo formado por las capas P+/Nwell tiene de  $10\ \mu\text{m}$  de lado (habría que quitarle el área sustraída para poder hacer el contacto) y el fotodiodo formado por Nwell/Psub tiene  $10.86\ \mu\text{m}$  de lado.

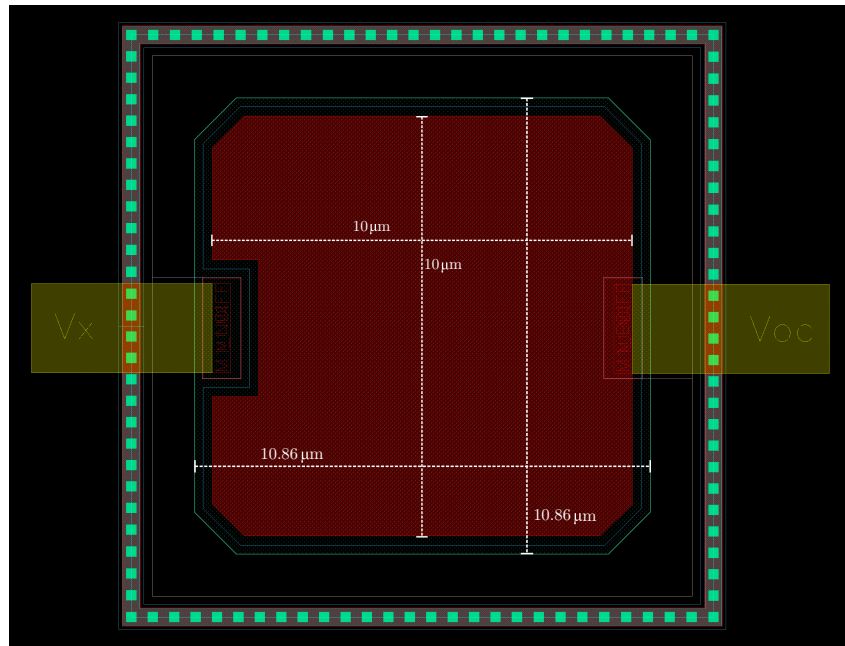


Figura 2.4: Layout Físico del fotodiodo P+/Nwell/Psub

En el fotodiodo implementado observamos como principal diferencia respecto al anterior la existencia de una capa de difusión “Diff layer”, en rojo. Esta sirve para indicar al fabricante la existencia de una capa superficial, cuyo dopado debemos indicarle superponiendo otra capa (bien una capa “P+” (azul) si queremos una capa P+ o bien una “N+” (naranja) si queremos la contraria). Comentar también que las distancias entre capas no son arbitrarias, estas son las mínimas distancias entre pozos que nos permite el fabricante utilizadas para así poder reducir al máximo el área usada. Por último, tal y como se observa en la Figura 2.3, el contacto N+ se sitúa sobre el pozo Nwell, dado que este está cubierto por la capa P+, se ha tenido que realizar un corte en esta última capa para establecer el contacto, lo cual nos conlleva una reducción de área efectiva en nuestro fotodiodo.



## 2.3. N<sup>+</sup>/Pwell/Deep NWell/Psub

### 2.3.1. N<sup>+</sup>/Pwell/Deep NWell/Psub: Sección transversal y equivalente circuital

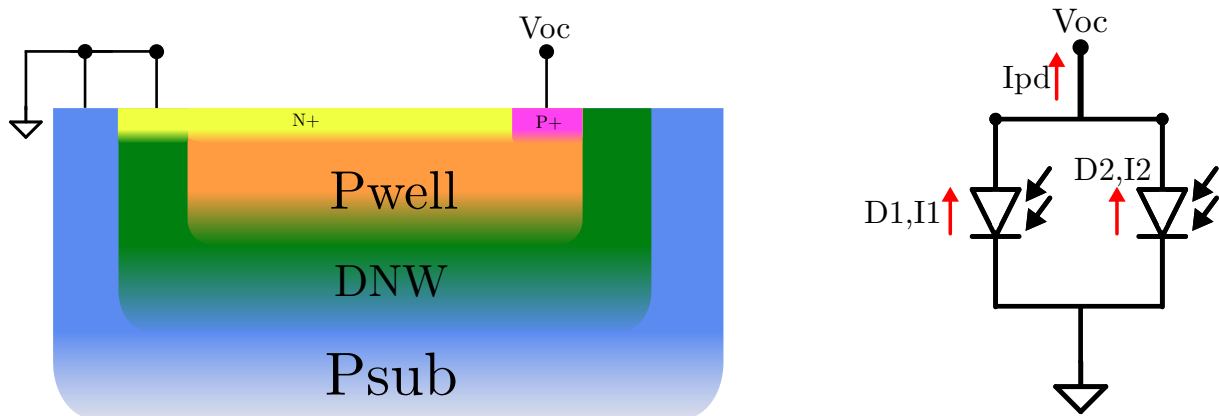


Figura 2.5: Sección transversal y equivalente circuital del fotodiodo N<sup>+</sup>/Pwell/Deep NWell/Psub

Observamos ahora como tenemos 3 posibles fotodiodos, donde el fotodiodo formado por las capas DNW/Psub está cortocircuitado, con lo que no interviene en la operación. Luego, tenemos el formado por Pwell/DNW (D1) y el formado por N<sup>+</sup>/Pwell (D2), también se podría construir un solo fotodiodo si, por ejemplo, no colocásemos la capa N<sup>+</sup>, pero más adelante veremos que esta configuración es más eficiente. Por otro lado, se observa una clarísima mejoría respecto al fotodiodo anterior, en este, podemos obtener prácticamente el doble de fotocorriente generada en el mismo área, pues realmente tenemos dos fotodiodos en paralelo (el N<sup>+</sup>/Pwell y el Pwell/DNW). Además, poseer un pozo a tan poca profundidad (N<sup>+</sup>/Pwell) nos permite tener un pico de sensibilidad en el azul (recordemos la ecuación de la absorción lumínica en el silicio, Ecuación 1.7). Este fotodiodo se estudia a detalle en [15]. Notar como se extiende la capa N<sup>+</sup> por fuera de la Pwell, con el objetivo de que sirva de contacto tanto para la capa N<sup>+</sup> como para la capa DNW, además, se coloca el contacto fuera del área que conforma el fotodiodo N<sup>+</sup>/Pwell, ya que este contacto metálico opacaría la luz que incidiese sobre él y no se recolectaría.

Para calcular la expresión de  $V_{oc}$ , observando el equivalente circuital y forzando la condición de  $I_{pd} = 0$ , se llega a:

$$\begin{aligned}
I_{pd} = I_1 + I_2 = 0 &= I_{ph1} - I_{s1}(e^{\frac{V_{oc}}{nU_T}} - 1) + I_{ph2} - I_{s2}(e^{\frac{V_{oc}}{nU_T}} - 1) \rightarrow \frac{I_{ph1} + I_{ph2}}{I_{s1} + I_{s2}} + 1 = e^{\frac{V_{oc}}{nU_T}} \rightarrow \\
V_{oc} &= nU_T \ln \left( \frac{I_{ph1} + I_{ph2}}{I_{s1} + I_{s2}} + 1 \right) = nU_T \ln \left( \frac{I_{ph1}}{I_{s1}} \cdot \frac{1 + \frac{I_{ph2}}{I_{ph1}}}{1 + \frac{I_{s2}}{I_{s1}}} + 1 \right)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Se observa que se obtiene la misma expresión que para un solo fotodiodo (como el caso de la estructura Nwell/Psub, Expresión 2.2, o la expresión que nos resultaría si no tuviesemos la capa N+ y solo el fotodiodo Pwell/DNW), pero con un factor  $\left( \frac{1 + \frac{I_{ph2}}{I_{ph1}}}{1 + \frac{I_{s2}}{I_{s1}}} \right)$  multiplicando a  $\frac{I_{ph1}}{I_{s1}}$ , donde está claro que la tensión obtenida ( $V_{oc}$ ) es mayor si se cumple que  $\frac{I_{ph2}}{I_{ph1}} > \frac{I_{s2}}{I_{s1}}$ . A priori, esta desigualdad es difícil de demostrar teóricamente, pues tanto  $I_{ph}$  como  $I_s$  son dependientes del área y de parámetros tecnológicos que no se conocen, no obstante, en [15] se caracteriza este fotodiodo y se demuestra que la desigualdad siempre se cumple para cualquier iluminación, con lo que esta configuración de fotodiodos en paralelo siempre obtiene una  $V_{oc}$  mayor que si pusiésemos un solo fotodiodo (en nuestro caso el Pwell/DNW).

### 2.3.2. N+/Pwell/Deep NWell/Psub: Layout Físico

Se ha implementado un fotodiodo cuadrado, con dimensiones del fotodiodo N+/Pwell de 10  $\mu\text{m}$  de lado, asimismo para el PWell/DNW. Por último, el fotodiodo DNW/Psub posee 13  $\mu\text{m}$  de lado, pero ha sido cortocircuitado a tierra conectándolo con metal 1 al anillo de guarda.

Dado que nuestra tecnología no es Triple-Well, no se ha podido utilizar la capa DNW para el layout físico del fotodiodo. No obstante, esto ha sido solventado utilizando otra capa, la Twell (en verde en el diseño), esta capa posee dopado tipo N y permite situar en su interior una capa Pwell e integrarlo en nuestra tecnología, así pues, la capa Nwell pasa a comportarse como la capa DNW del esquema, la Twell pasa a comportarse a efectos prácticos como la Pwell y el resto se mantiene, siendo así capaces de integrar dicho fotodiodo. Como detalle, no hay que indicar explícitamente en el layout donde

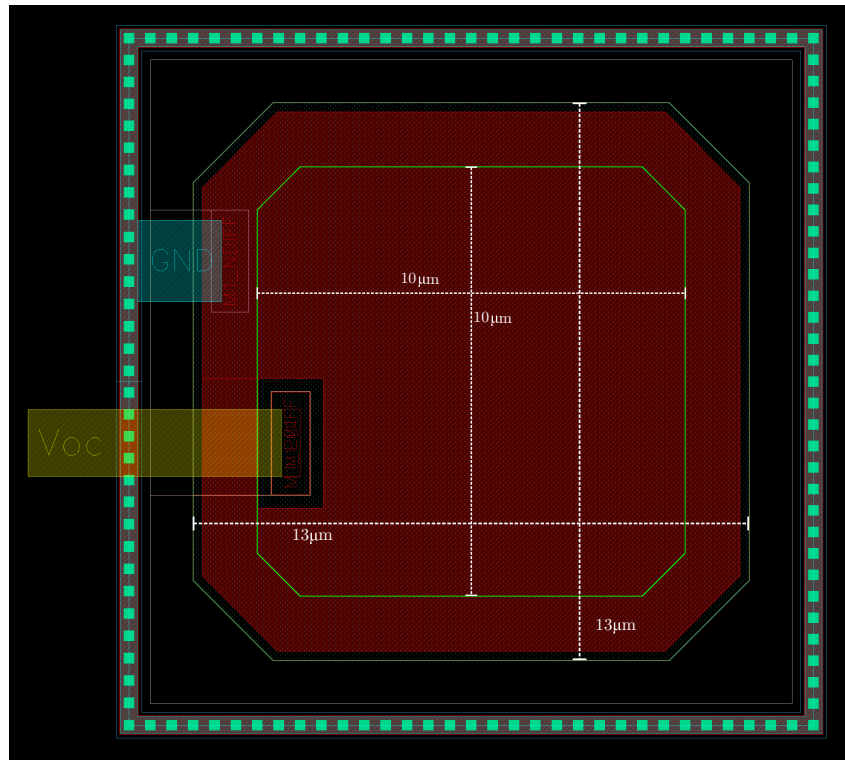


Figura 2.6: Layout Físico del fotodiodo N+/Pwell/DNW/Psub

queremos el Pwell, el propio fabricante detecta que tenemos un Nwell, un Twell y un N+ y el mismo rellena el espacio entre el Twell y el N+ por el pozo Pwell. Por último, se hace patente la necesidad de realizar un corte en las capas Diff y N+, para poder realizar el contacto a la capa Pwell (Twell en nuestra implementación), además, se coloca el contacto a las capas N+ y DNW (Nwell en nuestra implementación) fuera del área de actuación del fotodiodo N+/Pwell (Twell), para así maximizar el área útil.



# CAPÍTULO 3

## Estructuras de fotodiodos

En este capítulo se presenta un estudio de cinco posibles configuraciones distintas que nos permitirían obtener tensiones de salida ( $V_{oc}$ ) múltiplos de las que son capaces de conseguir los distintos fotodiodos por separado. Estas estructuras estarán compuestas por los fotodiodos ya explicados, utilizando en cada una las mejoras que cada fotodiodo introduce.

### **3.1. Estructura 1: Propuesta por M. K. Law y A. Bermak, configuración doble etapa (1:1) y configuración doble etapa (8:1)**

Esta estructura, inicialmente propuesta en el artículo de A. Bermak [29], consiste en la conexión en serie de fotodiodos tipo P+/Nwell/Psub, puesto que tienen ambos terminales libres, sin conectar al sustrato. Esto, les permitió estudiar cuantos de estos fotodiodos eran necesarios conectar y de qué manera, con el fin de obtener tensiones de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) superiores. En este trabajo, nos centraremos en dos de sus configuraciones, estudiaremos primero la más básica para darnos cuenta de la problemática principal de la estructura y luego se revisará e implementará la que mejor resultado les dio. No obstante, en las siguientes secciones se realizarán sendos cambios que permitirán mejorar el rendimiento de la estructura.

### 3.1.1. Estructura doble etapa (1:1): Sección transversal y equivalente circuital

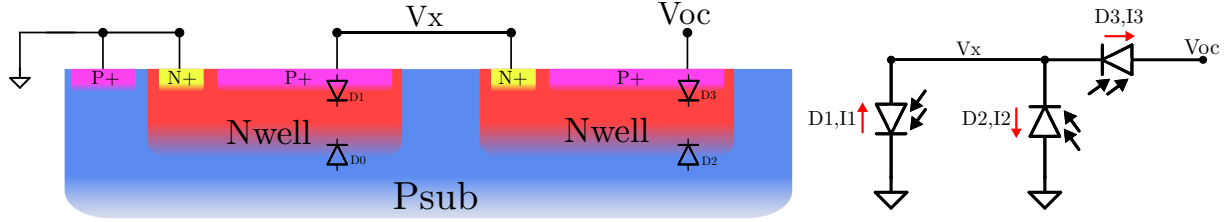


Figura 3.1: Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de 2 etapas (1:1)

Notar, como el fotodiodo “D0” está cortocircuitado. Analicemos la estructura para obtener primero la expresión de  $V_x$  para luego poder obtener la expresión de  $V_{oc}$ :

$$I_3 = I_1 - I_2 = 0 \rightarrow I_{ph1} - I_{s1}(e^{\frac{V_x}{nU_T}} - 1) - I_{ph2} + I_{s2}(e^{\frac{V_x}{nU_T}} - 1) = 0$$

$$\frac{I_{ph1} - I_{ph2}}{I_{s1} - I_{s2}} + 1 = e^{\frac{V_x}{nU_T}} \rightarrow V_x = nU_T \ln \left( \frac{I_{ph1} - I_{ph2}}{I_{s1} - I_{s2}} + 1 \right) \quad (3.1)$$

Ahora, podemos obtener la expresión de  $V_{oc}$ :

$$I_3 = 0 \rightarrow I_{ph3} - I_{s3}(e^{\frac{V_{oc}-V_x}{nU_T}} - 1) = 0 \rightarrow \frac{I_{ph3}}{I_{s3}} + 1 = e^{\frac{V_{oc}}{nU_T}} \cdot e^{\frac{-V_x}{nU_T}}$$

$$V_{oc} = nU_T \ln \left[ \left( \frac{I_{ph3}}{I_{s3}} + 1 \right) e^{\frac{V_x}{nU_T}} \right] = nU_T \ln \left( \frac{I_{ph3}}{I_{s3}} + 1 \right) + V_x \quad (3.2)$$

Como se observa, la tensión  $V_{oc}$  es la tensión generada a través del fotodiodo D3 más la que se consiga obtener en el nodo de unión de D1 y D2. Si observamos la tensión en dicho nodo a través de la Ecuación 3.1, se observa que el valor de dicha tensión está íntimamente relacionada al cociente  $\left( \frac{I_{ph1}-I_{ph2}}{I_{s1}-I_{s2}} \right)$ . En el artículo de estudio se caracteriza este sistema, donde se obtiene un valor negativo de  $V_x$  y por tanto una  $V_{oc}$  inferior a si solo tuviésemos un fotodiodo tipo P+/Nwell/Psub (es por esto que no se ha realizado layout físico, pues esta estructura está demostrada que es peor que la colocación de un solo fotodiodo). Además, se obtiene que la fotocorriente generada en el fotodiodo D2 es aproximadamente 8 veces mayor que la generada en D1, con lo cual este fotodiodo está sustrayendo corriente del nodo  $V_x$  y provocando que el numerador del cociente sea negativo y por tanto  $V_x$  también.

Por último, se presenta una solución, se pueden conectar 8 fotodiodos tipo P+/Nwell/Psub al nodo  $V_x$ , para así aumentar la corriente que se introduce a dicho nodo y conseguir que el numerador del cociente sea positivo, y por tanto obtengamos una  $V_{oc}$  mayor, aunque sacrificando cierta área, esta es la configuración de dos etapas (8:1).

### 3.1.2. Estructura doble etapa (8:1): Sección transversal y equivalente circuital

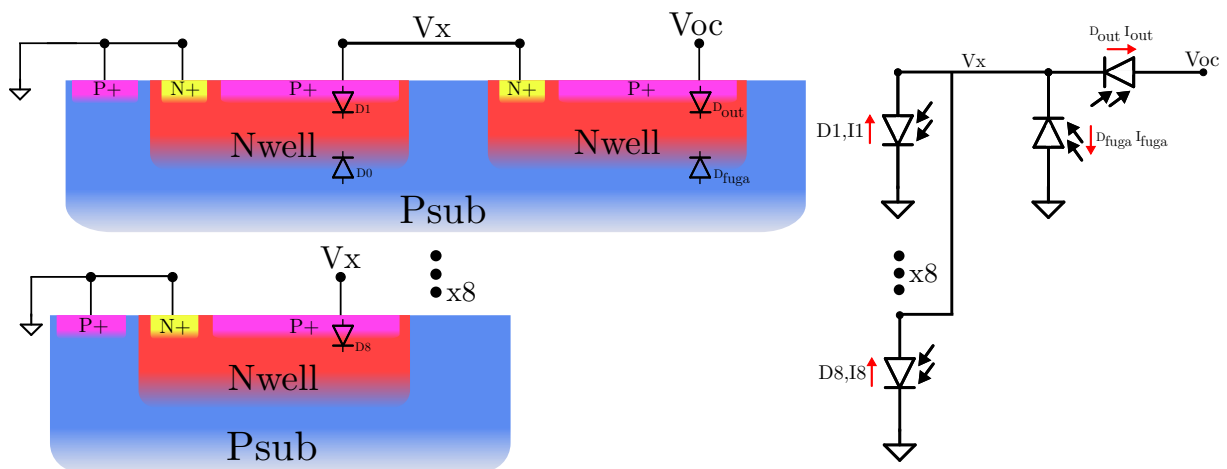


Figura 3.2: Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de 2 etapas (8:1)

Mediante un cálculo sencillo como el realizado en el apartado anterior para el cálculo de  $V_x$  es fácil llegar a la conclusión de que en una implementación con “k” fotodiodos en paralelo se obtiene:

$$V_x = nU_T \ln \left( \frac{\sum_{n=1}^k I_{phn} - I_{ph,D.fuga}}{\sum_{n=1}^k I_{sn} - I_{s,D.fuga}} + 1 \right) \quad (3.3)$$

Con lo cual, podemos forzar a que  $V_x$  sea positivo añadiendo más fotodiodos y sacrificando área.

### 3.1.3. Estructura doble etapa (8:1): Layout físico

Se ha implementado la estructura de doble etapa (8:1) de  $30 \mu\text{m}$  de lado. Esta consiste en 8 fotodiodos rodeando al fotodiodo de salida. Se ha obtenido la tensión de salida  $V_{oc}$

3.1- Estructura 1: Propuesta por M. K. Law y A. Bermak, configuración doble etapa (1:1) y configuración doble etapa (8:1) con metal 2, utilizando los “huecos” que nos resultan entre cada fotodiodo de la periferia exterior, para asi no opacar posibles zonas donde puede haber recolección.

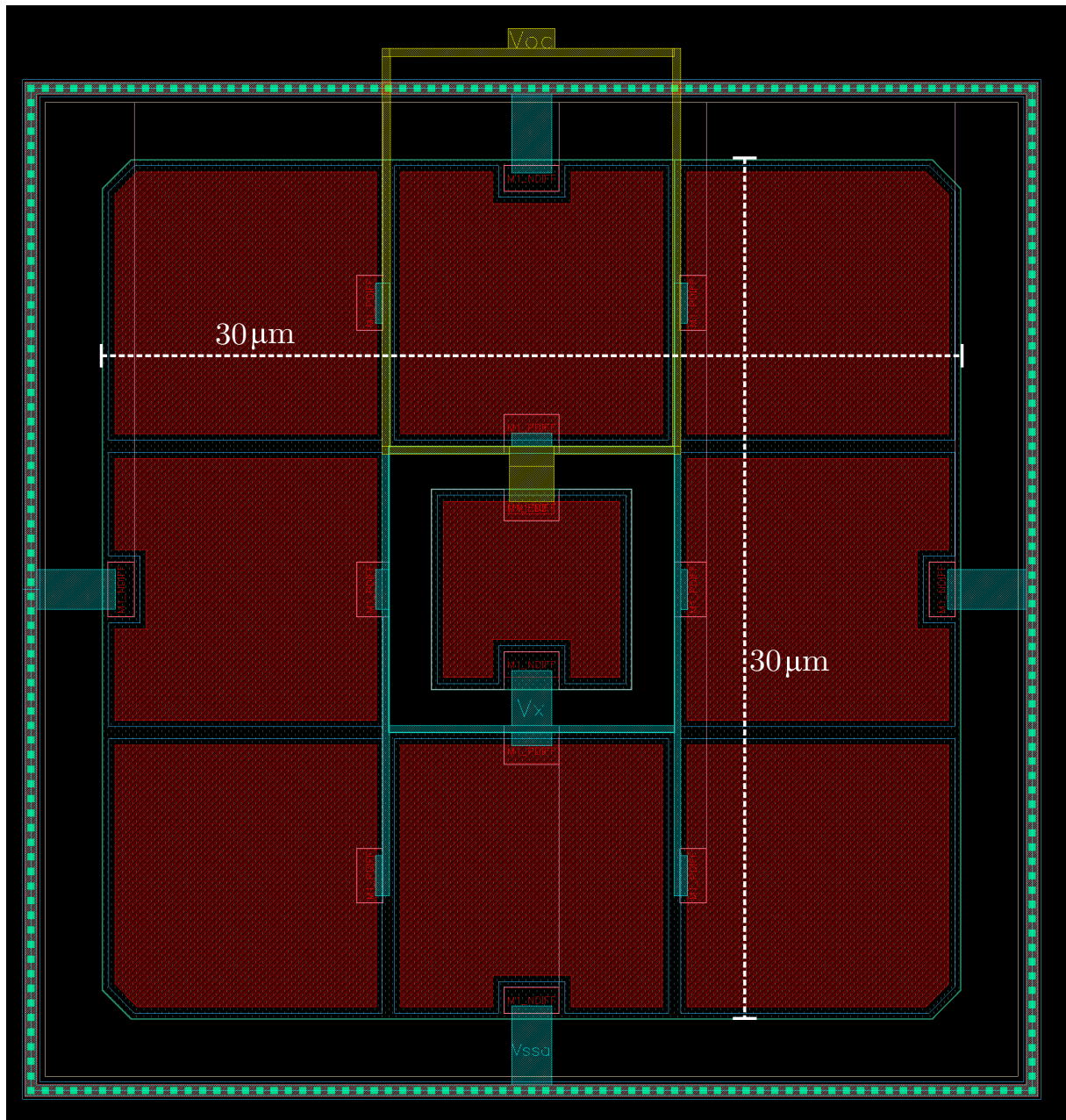


Figura 3.3: Layout físico de una estructura de 2 etapas (8:1)



### 3.2. Estructura 2: Compensación en paralelo

Como ya se ha visto, el problema reside en que hay que introducir corriente al nodo  $V_x$  para compensar el diodo de fuga. Podemos utilizar un fotodiodo ya estudiado, el N+/Pwell/DNW/Psub, que, recordemos, consistía en dos fotodiodos en paralelo. Como ya se comentó, esto nos permite recolectar más corriente, ya que añadimos cierta sensibilidad al azul. Con lo cual, en vez de 8 fotodiodos conectados al nodo  $V_x$ , a priori, con 4 con esta estructura nos sería suficiente, conllevando un gran ahorro de área.

#### 3.2.1. Estructura doble etapa con compensación en paralelo (4:1): Sección transversal y equivalente circuital

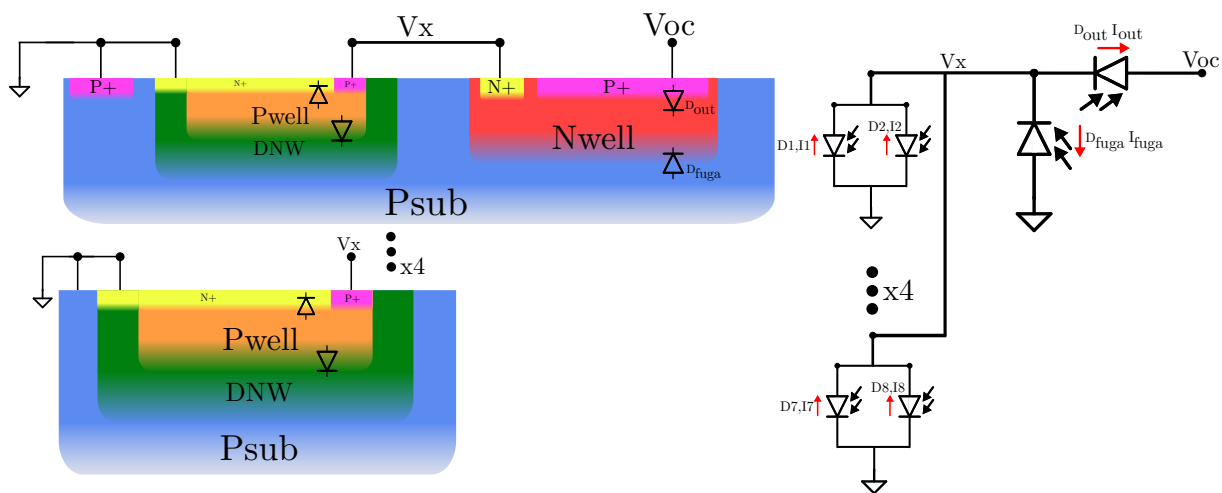


Figura 3.4: Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de 2 etapas con compensación en paralelo (4:1)

#### 3.2.2. Estructura doble etapa con compensación en paralelo (4:1): Layout Físico

Nótese en la Figura 3.5 que no se han implementado 4 fotodiodos en torno al fotodiodo de salida, esto es, porque se ha utilizado la propiedad de que la fotocorriente generada depende linealmente con el área (Ecuación 1.12), así pues, se ha construido el fotodiodo de compensación con un área 4 veces mayor que el de salida. Esto conlleva un ahorro

sustancial en área utilizada, pues hacer los 4 fotodiodos de compensación por separado hubiese conllevado un aumento de área consumida debido a que el DRC nos obliga a mantener cierta distancia entre pozos.

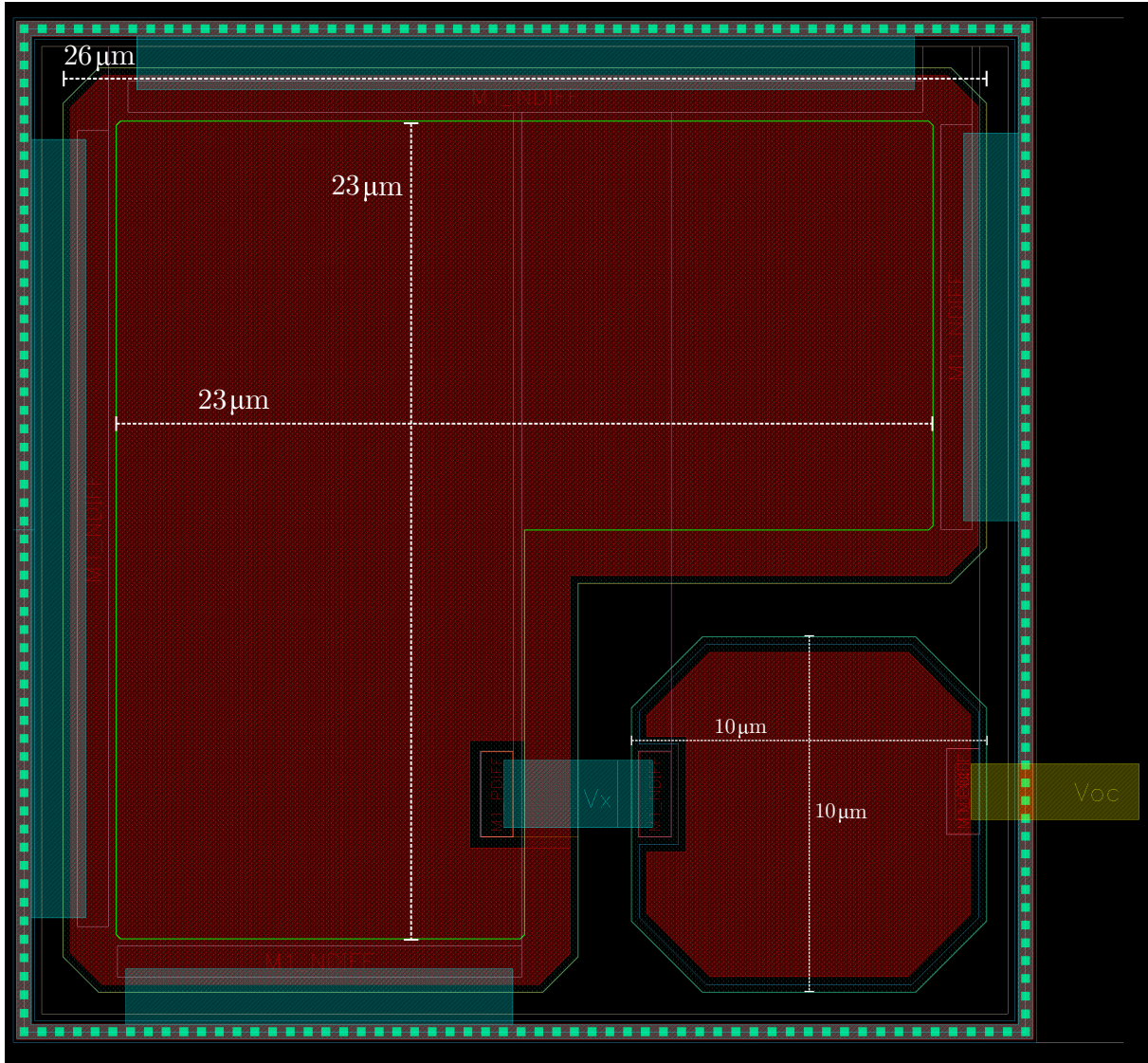


Figura 3.5: Layout físico de una estructura de 2 etapas con compensación en paralelo (4:1)

### 3.3. Estructura 3: Compensación triple

Esta estructura sigue explotando la capacidad de construir fotodiodos en vertical, utilizando capas de distintas profundidades. No obstante, en este trabajo solo se presenta de manera teórica, pues es necesario una tecnología Triple Well de la cual no disponemos

(aunque son comunes hoy en día). Esta estructura en la rama de compensación nos ayudaría a disminuir los fotodiodos de compensación de 8 a 3, además, debido a las diversas profundidades a las que se encuentran nuestras zonas de deplexión, sería muy sensible a varias longitudes de onda, se presenta su sección transversal en la Figura 3.6.

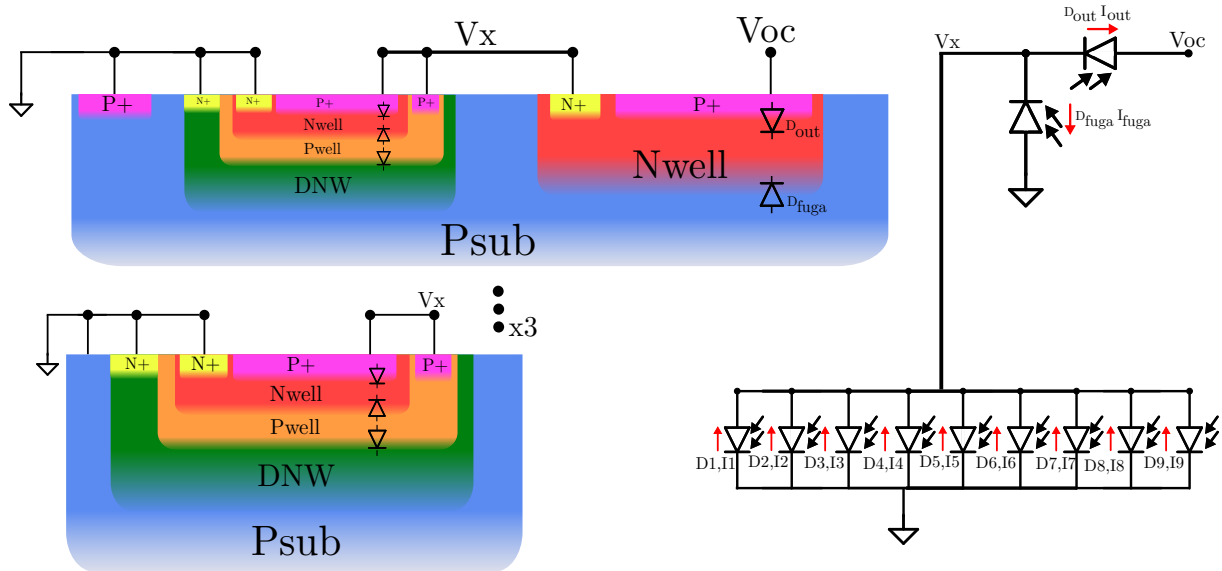


Figura 3.6: Layout físico de una estructura de 2 etapas con compensación en paralelo (4:1)

### 3.4. Estructura 4: Compensación en paralelo con salida en paralelo

A continuación se propone el estudio de una configuración cambiando el fotodiodo de salida (P+/Nwell/Psub) por el fotodiodo N+/Pwell/DNW/Psub para comprobar en qué afecta este último al comportamiento de la estructura y a la tensión de circuito abierto.

#### 3.4.1. Estructura doble etapa con compensación y salida en paralelo: Sección transversal y equivalente circuital

Como ya se ha tratado con anterioridad, la compensación nos permite asegurar que el voltaje  $V_x$  sea positivo. Supondremos también que ya nos encontramos en el estacionario,

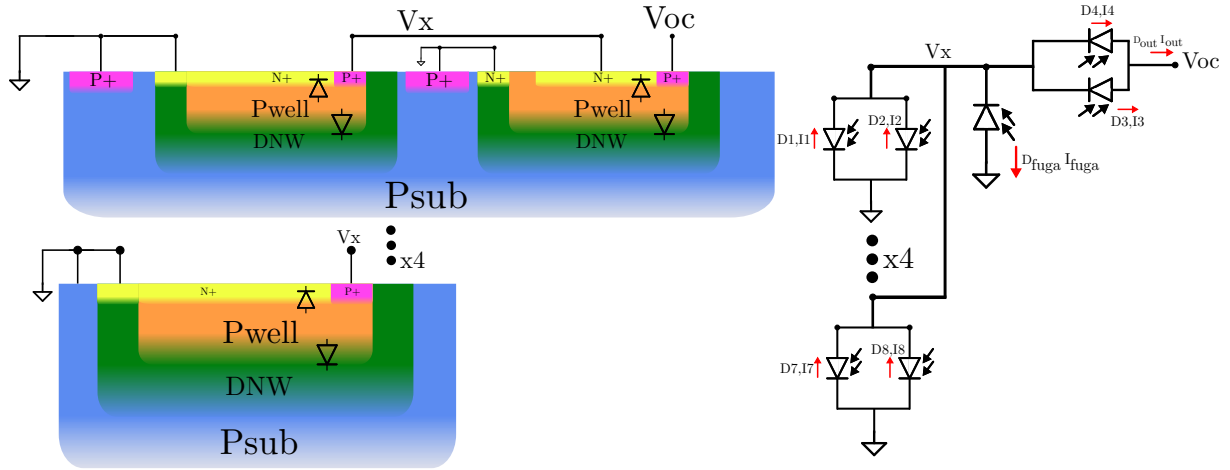


Figura 3.7: Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de 2 etapas con compensación y salida en paralelo

es decir, el diodo de compensación ha alcanzado su tensión de circuito abierto y el nodo de  $V_x$  es de alta impedancia, con lo cual solo hay que analizar a partir del fotodiodo de fuga. Calculemos la tensión de circuito abierto de la estructura:

$$I_{out} = 0 = I_3 + I_4 = I_{ph3} - I_{s3} \left( e^{\frac{V_{oc} - V_x}{nU_T}} - 1 \right) + I_{ph4} - I_{s4} \left( e^{\frac{V_{oc} - V_x}{nU_T}} - 1 \right) \rightarrow \frac{I_{ph4} + I_{ph3}}{I_{s4} + I_{s3}} + 1 = e^{\frac{V_{oc} - V_x}{nU_T}} \rightarrow$$

$$V_{oc} = nU_T \ln \left( \frac{I_{ph4} + I_{ph3}}{I_{s4} + I_{s3}} + 1 \right) + V_x = nU_T \ln \left( \frac{I_{ph4}}{I_{s3}} \cdot \frac{1 + \frac{I_{ph3}}{I_{ph4}}}{1 + \frac{I_{s3}}{I_{s4}}} + 1 \right) + V_x \quad (3.4)$$

Como cabría esperar, se obtiene la misma tensión que obtuvimos para el fotodiodo N+/Pwell/DNW/Psub, el cual proporciona tensiones de salida de algunos milivoltios extra con respecto al P+/Nwell/Psub, con lo que esta estructura será capaz de obtener una  $V_{oc}$  algo mayor utilizando la misma cantidad de área.

### 3.4.2. Estructura doble etapa con compensación y salida en paralelo: Layout Físico

Obsérvese que el layout es completamente idéntico al mostrado en la Figura 3.5 pero cambiando el fotodiodo de salida.

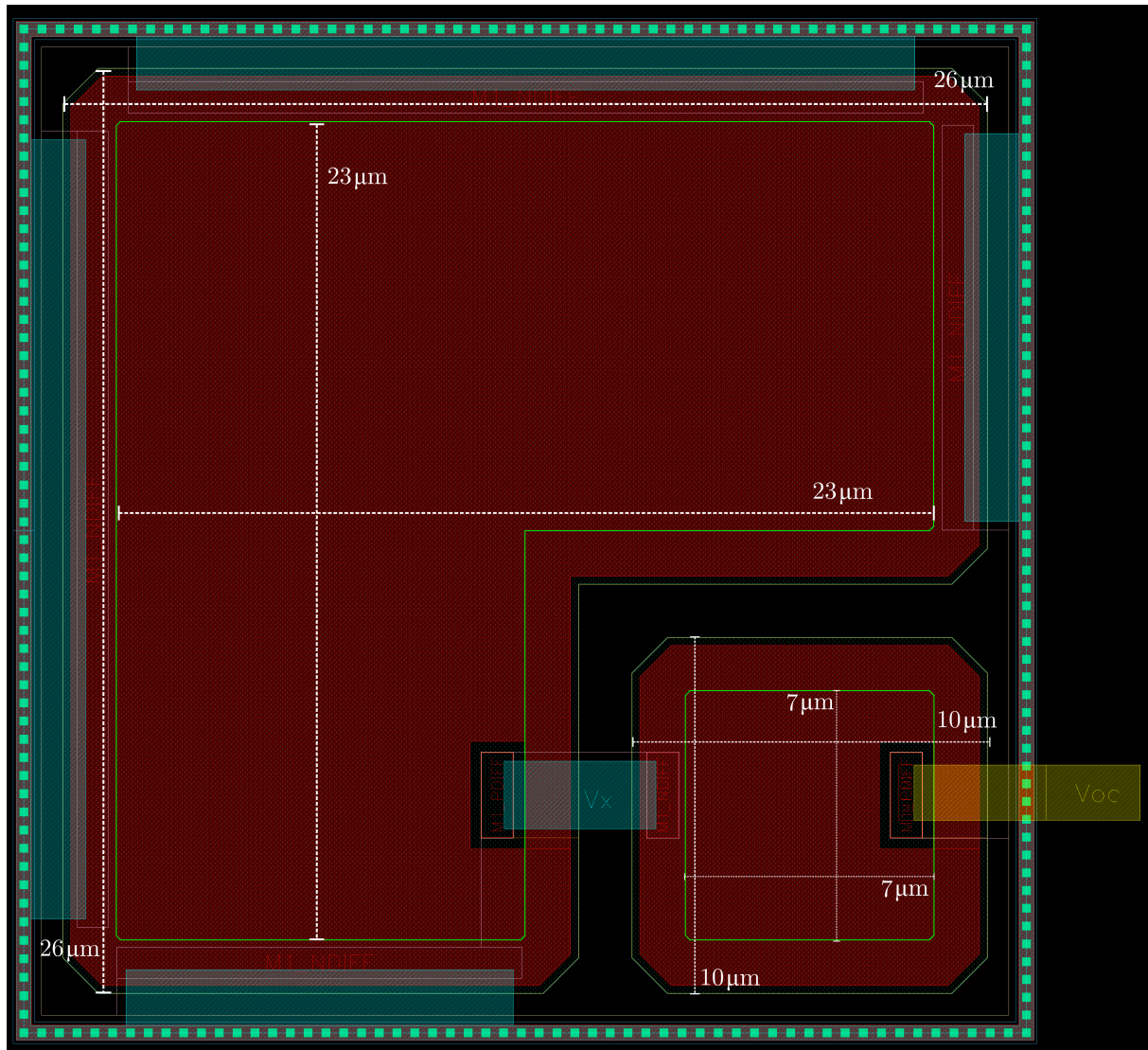


Figura 3.8: Layout físico de una estructura de 2 etapas con compensación y salida en paralelo

### 3.5. Estructura 5: “Boost” de $V_{oc}$ mediante conexión en serie de diodos Schottky

Por último, propongo una estructura que permite aumentar la tensión de circuito abierto mediante conexión en serie de diodos Schottky, provocados por la heterounión Metal/N+. Esta estructura es ventajosa, pero no intergrable en UMC  $0.18 \mu m$ , con lo que se estudiará su funcionamiento y no se presentará su layout físico. Partamos analizando la estructura propuesta mostrada en la Figura 3.9.

### 3.5.1. Estructura de “Boost” de $V_{oc}$ mediante conexión en serie de diodos Schottky: Sección transversal y equivalente circuital

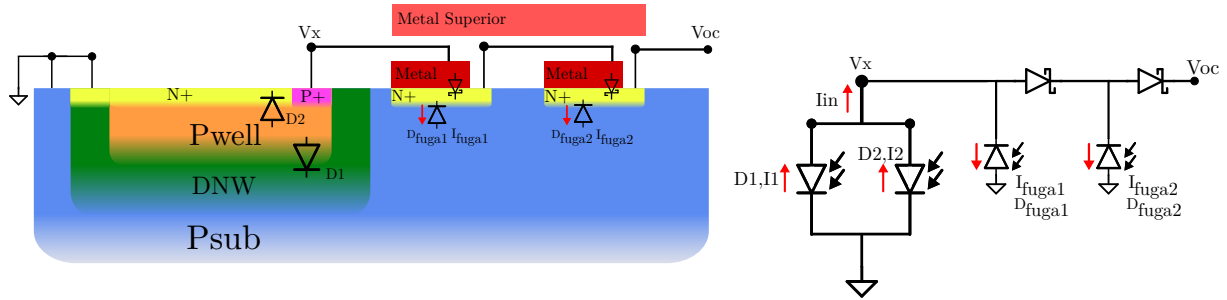


Figura 3.9: Sección transversal y equivalente circuital de una estructura de “Boost” de  $V_{oc}$  mediante conexión en serie de diodos Schottky

Si observamos el circuito equivalente a esta estructura, notamos que es un equivalente que ya hemos tratado, en concreto, en la Figura 3.1, la cual fue la primera estructura estudiada en este capítulo. En esta, llegamos a la conclusión de que las fugas eran superiores a la corriente que introducíamos ( $I_{in}$ ), y esto nos obligaba a introducir el concepto de compensación. Este diseño ataca dicha misma problemática pero desde distinto ángulo, ya que no buscamos añadir una compensación, sino reducir al máximo la corriente de fuga. Recordemos la Ecuación 3.3, que nos indicaba el valor del nudo “ $V_x$ ” para el diseño (8:1):

$$V_x = nU_T \ln \left( \frac{\sum_{n=1}^k I_{phn} - I_{ph,D.fuga}}{\sum_{n=1}^k I_{sn} - I_{s,D.fuga}} + 1 \right)$$

Esta, podemos reescribirla para nuestro equivalente circuital:

$$V_x = nU_T \ln \left( \frac{I_{ph1} + I_{ph2} - I_{ph,D.fuga1}}{I_{s1} + I_{s2} - I_{sfuga1}} + 1 \right) \quad (3.5)$$

Notar que, se han usado dos etapas de diodos Schottky a modo de ejemplo, pero se podrían añadir más simplemente añadiendo nuevos pozos. Ahora, entran en juego el uso de diodos Schottky, estos, son muy superficiales y pequeños, con lo que  $I_{ph,D.fuga1}$  y  $I_{sfuga1}$  son a su misma vez, pequeños (recordemos que ambos son dependientes del área, tal y como se vió en la introducción teórica). Además, para reducir la fotocorriente generada

por el fotodiodo de fuga parásito N+/Psub se añade una capa de metal, por encima del fotodiodo, que sirve para protegerlo de la luz incidente y así evitar dicha fotocorriente generada.

Supongamos que empezamos a iluminar nuestra estructura, los fotodiodos “D1” y “D2” funcionan como una fuente de corriente ( $I_{in}$ ) y, dado que tanto en el diodo Schottky como en el primer diodo de fuga dicha corriente intenta pasar del cátodo al ánodo, se empieza a acumular carga en el nodo “ $V_x$ ”. Eventualmente, debido a que la tensión “built-in” en el diodo Schottky es menor que en el fotodiodo de fuga (puesto que es una unión Metal/N+ frente a una N+/Psub), conseguiremos que nuestro diodo Schottky conduzca. Una vez este conduce, se repite la misma operación en el segundo diodo Schottky, así hasta que se vaya acumulando carga en  $V_{oc}$ . En última instancia, cuando se haya acumulado tanta carga en  $V_{oc}$  que no pueda pasar corriente por el segundo diodo Schottky, este habrá llegado a su tensión de circuito abierto, esto, se repite para el nodo entre los dos diodos Schottky, provocando que el primero también llegue a su tensión de circuito abierto. Para concluir, llegará un momento donde se haya acumulado tanta carga en el nudo “ $V_x$ ” que no pueda pasar corriente a través de este, y por tanto nuestros fotodiodos “D1” y “D2” habrán llegado a su tensión de circuito abierto, con lo cual, la tensión de circuito abierto se espera que sea la suma de las tres tensiones, la estructura en paralelo ( $\sim 0,45 V$ ) y la de dos diodos Schottky ( $\sim 0,15 - 0,2 V$ , cada uno).

### 3.6. Resumen de Resultados. Comparativa frente al arte

A continuación, se presenta pues en la Tabla 3.1, un breve resumen de los parámetros obtenidos y sus comparaciones respecto a fotodiodos básicos o estructuras del arte, con el objetivo de dar una visión más global y organizada del trabajo realizado.

En la misma, se observan ciertas tendencias que coinciden con lo estudiado en el desarrollo teórico. Para empezar, se observa la independencia de la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) con el área del fotodiodo, pues se hace patente en la comparación de los fotodiodos P+/Nwell y el N+/Pwell/DNW/Psub, ya que pese a tener el primero cuatro

veces más área, alcanzan una ( $V_{oc}$ ) similar.

Tal y como era de esperar, se ha obtenido una sensibilidad espectral mayor a longitudes de onda corta para el fotodiodo P+/Nwell, el cual es el más superficial. A longitudes de onda mayor para el Nwell/Psub, el cual es más profundo. Y, a una franja mucho mayor de longitudes de onda para el fotodiodo N+/Pwell/DNW/Psub, pues posee dos zonas de depleción a distinta altura, lo que lo hace más eficiente a la hora de recolectar fotones.

Por último, destacar el gran ahorro de área respecto al trabajo de A. Bermak [29], donde ellos no tenían acceso a herramientas de diseño, sino que sus fotodiodos estaban prefabricados, lo que les conllevaba un aumento consecuente de área utilizada. Así pues, para nuestra primera configuración propuesta se obtiene una reducción de área usada del 82.9%.

Tabla 3.1: Tabla resumen de los resultados, tanto de fotodiodos básicos como los valores esperados para las estructuras

Fotodiodo	Tecnología	Iluminación utilizada	$V_{oc}$	Área ( $\mu m^2$ )	Sensibilidad espectral	Ventajas	Contras	Referencia
Nwell/Psub	AMS 0.35 $\mu m$	Fuente de $6.37mW/cm^2$ a 555 nm	412 mV	441	Pico de sensibilidad en el rango [570-670 nm]**	Fotodiodo básico, fácil de comprender su funcionamiento	Ambos terminales conectados al sustrato. Poca $V_{oc}$	[29]
P+/Nwell	AMS 0.35 $\mu m$	Fuente de $6.37mW/cm^2$ a 555 nm	445 mV	441	Pico de sensibilidad en el rango [470-550 nm]***	Permite aislar terminales del sustrato	Su conexión en serie provoca fotodiodos de fuga	[29]
N+/Pwell/DNW/Psub	UMC 0.18 $\mu m$	Fuente de 39 klux, luz blanca	450 mV	100	Pico de sensibilidad en el rango [540-900 nm]	Mayor corriente generada en misma área	Escasa mejora de $V_{oc}$	[15]
A. Bermak (8:1)	AMS 0.35 $\mu m$	Fuente de $6.37mW/cm^2$ a 555 nm	0.84 V	3969	N/D	Escalable a más etapas. Voltajes obtenibles múltiples de 0.4V.	Gran cantidad de área usada para la compensación	[29]
<b>Estructura Propuesta: Compensación en paralelo*</b>	UMC 0.18 $\mu m$	N/A	$\sim 0,8V$	677	N/A	Reducción drástica del área usada para la compensación	No caracterizado	Este Trabajo
<b>Estructura Propuesta: Compensación y salida en paralelo*</b>	UMC 0.18 $\mu m$	N/A	$\sim 0,8V$	677	N/A	Aumento ligero de la $V_{oc}$ obtenida	No caracterizado	Este Trabajo
<b>Estructura Propuesta: "Boost" de <math>V_{oc}</math> mediante conexión en serie de diodos Schottky</b>	N/A	N/A	$\sim 0,6 - 0,8V$	N/A	N/A	Sin necesidad de etapas de compensación. Escalable.	No caracterizado	Este Trabajo

\*Estos datos son valores esperados, pues dado que son estructuras que nunca se han fabricado, no se han podido caracterizar aún.

\*\*Dato no perteneciente a dicha referencia, obtenido de [30], donde se caracteriza dicho fotodiodo para la tecnología de 0.5  $\mu m$ .

\*\*\*Dato no perteneciente a dicha referencia, obtenido de [31], donde se caracteriza dicho fotodiodo para la tecnología de 0.7  $\mu m$ .



# CAPÍTULO 4

## Conclusiones y futuras líneas de trabajo

A lo largo del trabajo, se ha conseguido comprender el funcionamiento de los fotodiodos, sus dependencias respecto a parámetros físicos, así como una comparativa frente al arte que nos ha aportado una visión global del punto donde nos encontramos.

Por otro lado, se han obtenido estructuras complejas capaces teóricamente de obtener tensiones de circuito abierto más altas que lo conseguido hasta la fecha, además, reduciendo al máximo el área utilizada. A su misma vez, hemos sido capaces de integrarlas en tecnología UMC 0.18  $\mu m$ , así como proponer algunas que nos ayudarían a conseguir nuestro objetivo pese a no ser integrables en nuestra tecnología. Espero que estas sean suficientemente atractivas para posibles implementaciones en futuros circuitos que necesiten tensiones del rango que hemos sido capaces de obtener. Esto, ha sido fruto de un largo trabajo de estudio y verificación, buscando las estructuras que posiblemente mejor funcionasen y donde se ha entendido el funcionamiento del software de diseño de CADENCE.

La integración de los fotodiodos en la tecnología va a permitir validarlos y comprobar de manera experimental su funcionamiento, así como su correlación con las ecuaciones mostradas a lo largo de este trabajo. De hecho, propongo esta caracterización como primera futura línea de trabajo. También, me resultaría coherente probar las mismas estructuras, pero añadiendo nuevas etapas, donde se tendrían que tener en cuenta, por ejemplo, la necesidad de compensación no solo en la etapa de salida, sino que también en la intermedia. Y, para terminar, propongo la búsqueda nuevas estructuras, más complejas si es necesario, donde se consigan tensiones de circuito abierto superiores, donde, quizás fuera necesario usar las estructuras presentadas aquí como “bloques básicos”.



# Bibliografía

- [1] Hannah Ritchie, Max Roser, and Pablo Rosado. Energy. *Our World in Data*, October 2022.
- [2] “Systems and architectures,” *International roadmap for devices and systems 2021 edition*, [https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2021/2021IRDS\\_SA.pdf](https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2021/2021IRDS_SA.pdf).
- [3] Rubén Gómez-Merchán, Juan Antonio Leñero Bardallo, and Ángel Rodríguez-Vázquez. A self-powered asynchronous image sensor with TFS operation. *IEEE Sensors Journal*, pages 1–1, 2023.
- [4] Ismail Cevik, Xiwei Huang, Hao Yu, Mei Yan, and Suat Ay. An Ultra-Low Power CMOS Image Sensor with On-Chip Energy Harvesting and Power Management Capability. *Sensors*, 15(3):5531–5554, March 2015.
- [5] M. K. Law, A. Bermak, and C. Shi. A Low-Power Energy-Harvesting Logarithmic CMOS Image Sensor With Reconfigurable Resolution Using Two-Level Quantization Scheme. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 58(2):80–84, February 2011. Conference Name: IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs.
- [6] R. Gómez-Merchán, R. De La Rosa-Vidal, J. A. Leñero Bardallo, and A. Rodríguez-Vázquez. On the implementation of in-pixel controlled diodes with sensing and energy harvesting capabilities. In *2022 17th Conference on Ph.D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, pages 105–108, Villasimius, SU, Italy, June 2022. IEEE.
- [7] Zhiyuan Chen, Man-Kay Law, Pui-In Mak, and Rui P. Martins. A Single-Chip Solar Energy Harvesting IC Using Integrated Photodiodes for Biomedical Implant Applications. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 11(1):44–53, February 2017. Conference Name: IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems.
- [8] Peter Spies, Markus Pollak, and Loreto Mateu, editors. *Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications*. Jenny Stanford Publishing, 0 edition, June 2015.
- [9] Muhammad Moid Sandhu, Sara Khalifa, Raja Jurdak, and Marius Portmann. Task Scheduling for Energy-Harvesting-Based IoT: A Survey and Critical Analysis. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(18):13825–13848, September 2021.

- [10] Umesh K. Mishra and Jasprit Singh. *Semiconductor device physics and design*. Springer, Dordrecht, 2008.
- [11] María López Carmona. Caracterización experimental de prototipos de sensores solares para navegación espacial. Trabajo Fin de Estudios, 2021.
- [12] Javier Sánchez Esperón. Optimización del consumo de energía de sensores de imagen autoalimentados. Trabajo Fin de Estudios, 2021.
- [13] Pablo Fernández Peramo and Juan Antonio Leñero Bardallo. Trabajo de Fin de Máster “Máster Universitario en Microelectrónica: Diseño y Aplicaciones de Sistemas Micro/Nanométricos”.
- [14] Jasprit Singh. *Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures*.
- [15] Rubén Gómez-Merchán, David Palomeque-Mangut, Juan Antonio Leñero Bardallo, Manuel Delgado-Restitutor, and Ángel Rodríguez-Vázquez. A comparative study of stacked-diode configurations operating in the photovoltaic region. *IEEE Sensors Journal*, pages 1–1, 2020.
- [16] Zahid Ullah. *Optoelectronics and Photonics, Principles and Practices*. S O Kasap. Prentice Hall.
- [17] Paul R. Gray, editor. *Analysis and design of analog integrated circuits*. Wiley, New York, 5th ed edition, 2009.
- [18] Juan Antonio Leñero Bardallo. *Photoreceptors in CMOS technology*.
- [19] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich. *Fundamentals of Photonics*. Hoboken, N.J, April 2007.
- [20] Kevin F. Brennan. *The physics of semiconductors: with applications to optoelectronic devices*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 1999.
- [21] Donald A. Neamen. *Semiconductor Physics And Devices: Basic Principles*. New York, NY, March 2011.
- [22] The Solar Cell. In *Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes: The role of the PN junction*, pages 159–213. John Wiley & Sons, Ltd, 2011. Section: 4 \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781119974543.ch4>.
- [23] Martin A. Green. *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*. Englewood Cliffs, NJ, January 1982.
- [24] Conversion of Chemical Energy into Electrical Energy. In *Physics of Solar Cells*, pages 93–107. John Wiley & Sons, Ltd, 2005. Section: 5 \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527618545.ch5>.
- [25] Gerhard Lutz. *Semiconductor radiation detectors: device physics*. Springer, Berlin, 2007.

- 
- [26] Richard S. Muller, Theodore I. Kamins, and Mansun Chan. *Device Electronics for Integrated Circuits*. New York, NY, October 2002.
- [27] Paul Horowitz and Winfield Hill. *The Art of Electronics Third Edition*. New York, NY, April 2015.
- [28] Robert F. Coughlin and Frederick F. Driscoll. *Operational amplifiers and linear integrated circuits*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J, 6th ed edition, 2001.
- [29] M. K. Law and A. Bermak. High-Voltage Generation With Stacked Photodiodes in Standard CMOS Process. *IEEE Electron Device Letters*, 31(12):1425–1427, December 2010.
- [30] Kartikeya Murari, Ralph Etienne-Cummings, Nitish Thakor, and Gert Cauwenberghs. Which Photodiode to Use: A Comparison of CMOS-Compatible Structures. *IEEE Sensors Journal*, 9(7):752–760, July 2009.
- [31] R. G. Correia, S. Pimenta, and G. Minas. CMOS Integrated Photodetectors and Light-to-Frequency Converters for Spectrophotometric Measurements. *IEEE Sensors Journal*, 17(11):3438–3445, June 2017.