

# 背照式CMOS图像传感器像素结构影响分析

王 玮

上海集成电路研发中心有限公司, 上海

收稿日期: 2024年3月25日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘 要

本文使用Ansys Lumerical FDTD软件建立了BSI-CIS工艺的仿真模型, 利用该模型基于55 nm BSI-CIS工艺, 针对2  $\mu\text{m}$ 和2.79  $\mu\text{m}$ 尺寸的像素单元, 对850 nm、940 nm波段不同CDTI图形结构的量子效率值进行仿真, 从而获得各自近红外吸收最高的CDTI图形结构, 该结构可在850 nm波长获得45%以上的量子效率。

## 关键词

BSI-CIS工艺, 仿真, CDTI图形结构, 量子效率

# Analysis for the Influence of Pixel Structure in Backside Illuminated CMOS Image Sensor

Wei Wang

Shanghai IC R&D Center, Shanghai

Received: Mar. 25<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

A back-side illuminated CMOS (BSI-CMOS) simulation model based on Ansys Lumerical FDTD was proposed. The Quantum Efficiency (QE) of 2  $\mu\text{m}$  and 2.79  $\mu\text{m}$  pitch pixel on different CDTI graphic design structures in 850 nm, 940 nm waveband were simulated and studied for 55 nm BSI-CIS process. The simulation results showed that the CDTI graph structure with the highest near-infrared absorption can be obtained, and the quantum efficiency of the structure can be more than 45% at 850 nm wavelength.

## Keywords

BSI-CIS, Simulation, CDTI Pixel Structure, Quantum Efficiency

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

背照式 CMOS (Back-Side illuminated CMOS, BSI-CMOS) 图像传感器逐渐成为手机摄像的主流, 而基于 BSI 结构的近红外图像传感器在人脸识别、动作感应等应用方面的需求不断增加[1]。现有背照式 CMOS 图像传感器(Back-Side illuminated CMOS Image Sensor, BSI-CIS)主要应用于可见光区域, 其对近红外波段的吸收较差[2]。若要实现近红外光相关功能, 必须增加 BSI-CIS 对近红外的敏感度[3]。

文献显示[4], 通过分析不同硅厚度条件下理论量子效率(Quantum Efficiency, QE)值与入射光波长关系, 提出通过增加衬底硅层厚度, 即增加光子吸收层的厚度, 对提升 QE 有显著影响, 同时也指出, 该方法对材料、工艺和器件设计要求高, 成本高, 同时会引入较大的串扰, 导致调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)较差。此外, 汪等人研究显示[5], 通过在硅衬底表面内形成单元沟槽隔离(Cell Deep Trench Isolation, CDTI)结构, 可调节光在硅衬底上下表面的反射和透射, 使得入射光在硅衬底中的有效吸收长度增加, 提高近红外 QE 值。该结构实现简单, 与标准 BSI 工艺兼容, 且不额外增加串扰。

本文通过使用 Ansys Lumerical FDTD 软件建立了 BSI-CIS 工艺的仿真模型, 基于 55 nm BSI-CIS 工艺, 针对 2 μm 和 2.79 μm 尺寸的像素单元, 对 850 nm、940 nm 波段不同 CDTI 图形结构的 QE 值进行仿真, 从而获得各自近红外吸收 QE 最高的 CDTI 图形结构。

## 2. 理论基础

Ansys Lumerical FDTD 软件是一款微纳光子器件仿真的标准工具, 通过搭建不同几何结构, 求解麦克斯韦方程组, 计算坡印亭矢量和光的透射、反射[6]。其计算过程通过时域有限差分法求解麦克斯韦方程组, 该方法是目前的主流方法。具体计算过程如下[7]:

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H}$$

$$\mathbf{D}(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega) \mathbf{E}(\omega)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{E}$$

其中  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{D}$  分别为磁矢量, 电矢量和电位移;  $\varepsilon_r(\omega)$  为相对介电常数( $\varepsilon_r(\omega) = n^2$ ,  $n$  为折射率)。

在三维仿真中, 麦克斯韦方程组包含 6 个电磁场分量:  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  和  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ 。假设仿真结构在  $z$  方向无限延伸且电磁场在  $z$  方向独立, 则有:

$$\varepsilon_r(\omega, x, y, z) = \varepsilon_r(\omega, x, y)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} = 0$$

此时麦克斯韦方程组可分为两组独立的方程组，每组包含 3 个矢量。其对应为横电波(transverse electric, TE)和横磁波(transverse magnetic, TM)方程组，并以如下变量求解相应方程：

$$\text{TE: } E_x, E_y, H_z$$

$$\text{TM: } H_x, H_y, E_z$$

搭建材料几何结构，定义网格和入射光源，基于上述方程，FDTD solver 会对空间离散格点进行求解。通常采用如图 1 所示的格点单元进行场分量的求解，并内插得到初始各格点的数据。

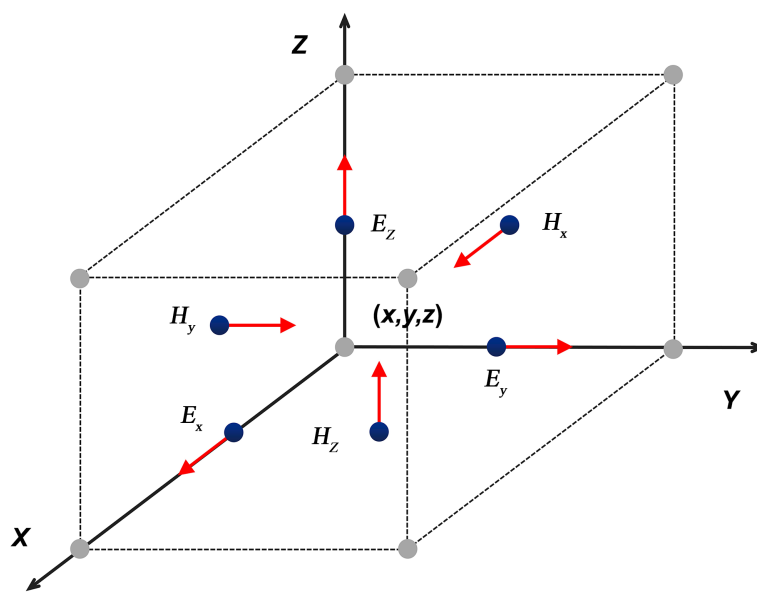


Figure 1. Diagram of the grid cell

图 1. 格点单元示意图

### 3. 仿真

#### 3.1. 仿真模型设计

图 2 给出了 QE 值仿真计算模型剖面示意图，通过在硅衬底上下表面增加两个能量监视器，分别计算得到 QE\_top 和 QE\_bottom，其中，

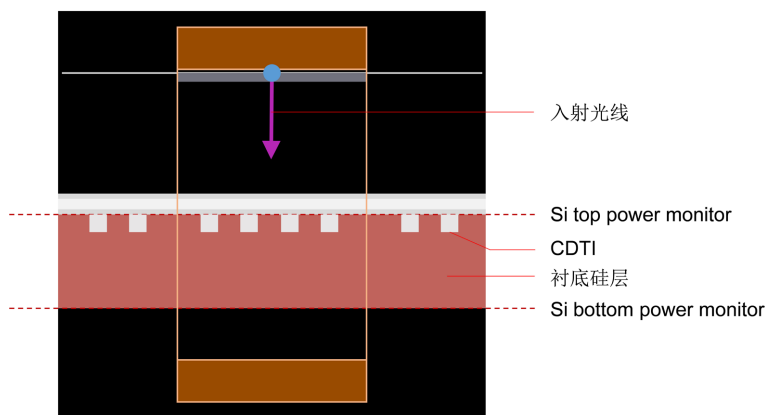


Figure 2. Diagram of the simulation calculation model for QE value

图 2. QE 值仿真计算模型剖面示意图

$$QE\_top = Pall\_top/Psource$$

$$QE\_bottom = Pall\_bottom/Psource$$

其中,  $Psource$  为入射光源能量,  $Pall\_top$  和  $Pall\_bottom$  分别为进入硅衬底顶部的入射光能量和离开硅衬底底部的入射光能量。则硅衬底对入射光的吸收效率, 即最终的  $QE$  值,  $QE\_abs$  可表示为:

$$QE\_abs = QE\_top - QE\_bottom$$

通常, 对于入射光为 UV (紫外) 和可见光的情况, 其被硅衬底完全吸收的长度远小于衬底厚度, 故  $QE\_bottom$  约为 0。其最终  $QE$  值即为硅衬底顶部的  $QE\_top$ 。因此在 UV (紫外) 和可见光仿真中, 只需采用硅衬底顶部的能量监视器计算  $QE$  值即可。而对于近红外光, 常规 BSI 硅衬底厚度(3  $\mu m$  左右)不足以完全吸收入射光,  $QE\_bottom$  较大, 故最终  $QE\_abs$  值需将该值减去, 才能正确得到近红外光的吸收效率。

## 3.2. 结构设计

### 3.2.1. 剖面结构设计

本文针对 55 nm BSI 2  $\mu m$  像素单元和 2.79  $\mu m$  像素单元的 CDTI 结构进行仿真, 二者硅衬底厚度略有不同, 其他参数均一致。两种结构剖面图如图 3 和图 4 所示, 其中, 考虑到入射光无法通过 M1, 故位于 M1 下方的 M2 等层次无需再加入图 3 和图 4 完整结构中。

### 3.2.2. CDTI 图形结构设计

本文针对 9 种不同的 CDTI 图形结构的  $QE$  值进行仿真计算, 编号分别为 Type0~Type8, 如图 5 所示, 每种图形方案示意图中, 灰色为 CDTI, 淡绿色为 Si 衬底。除特殊标注外, 每种 Type 类型只有 SX 和 cd 两个尺寸, 由对称性可确认完整图形。

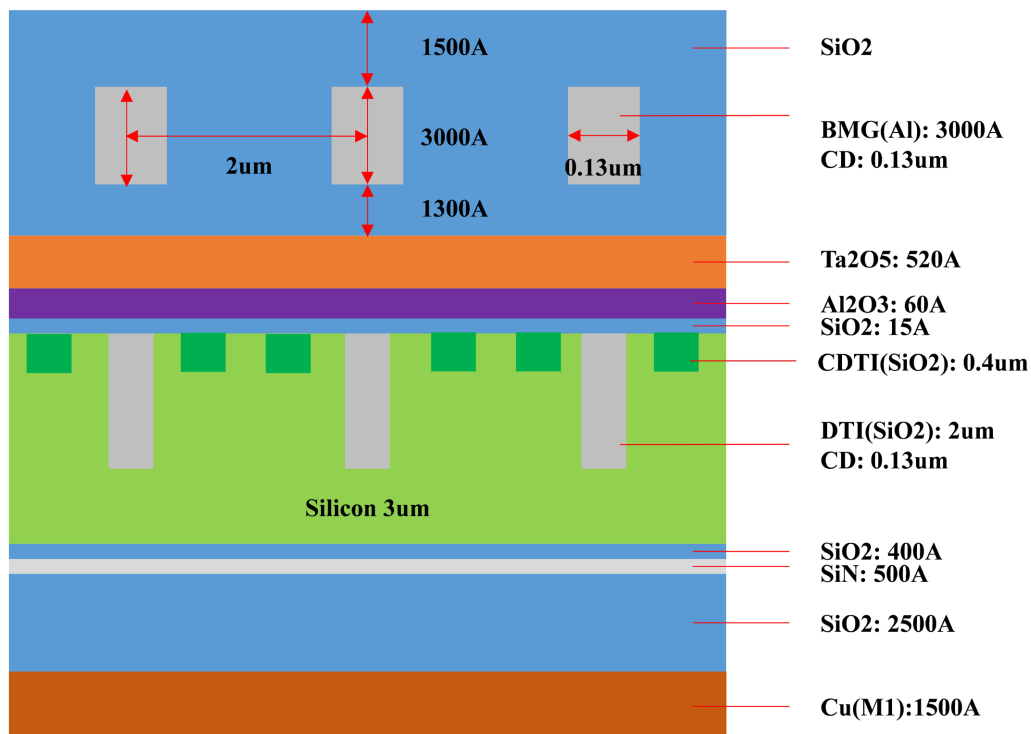


Figure 3. Diagram of the profile structure for 2  $\mu m$  pixel unite of 55 nm BSI

图 3. 55 nm BSI 2  $\mu m$  像素单元结构剖面图

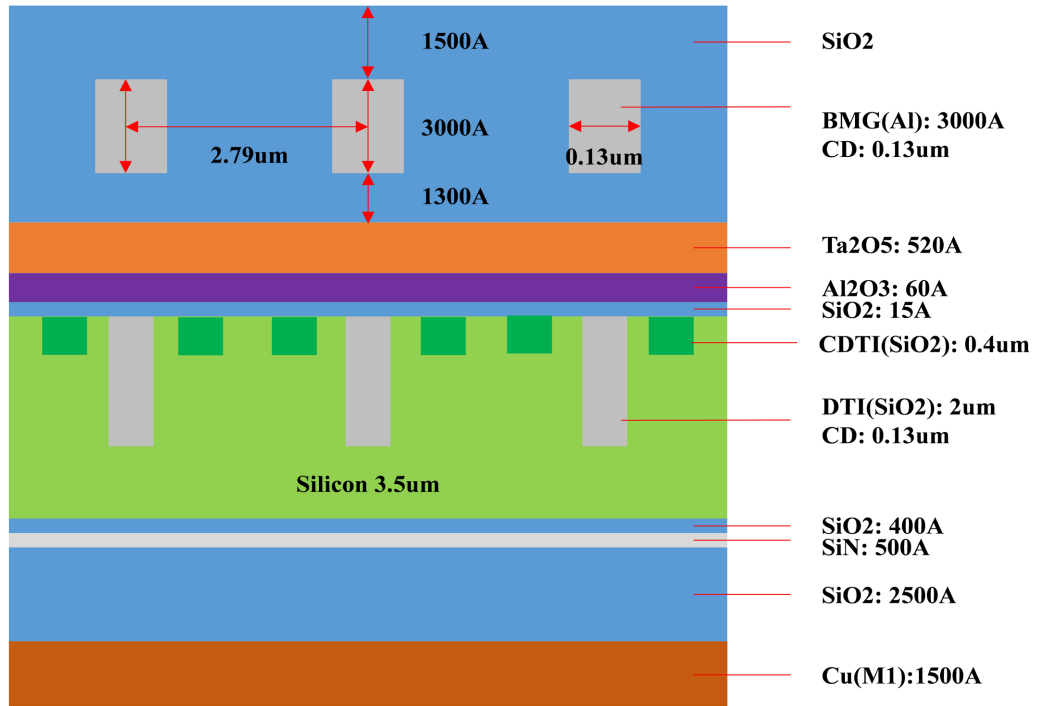
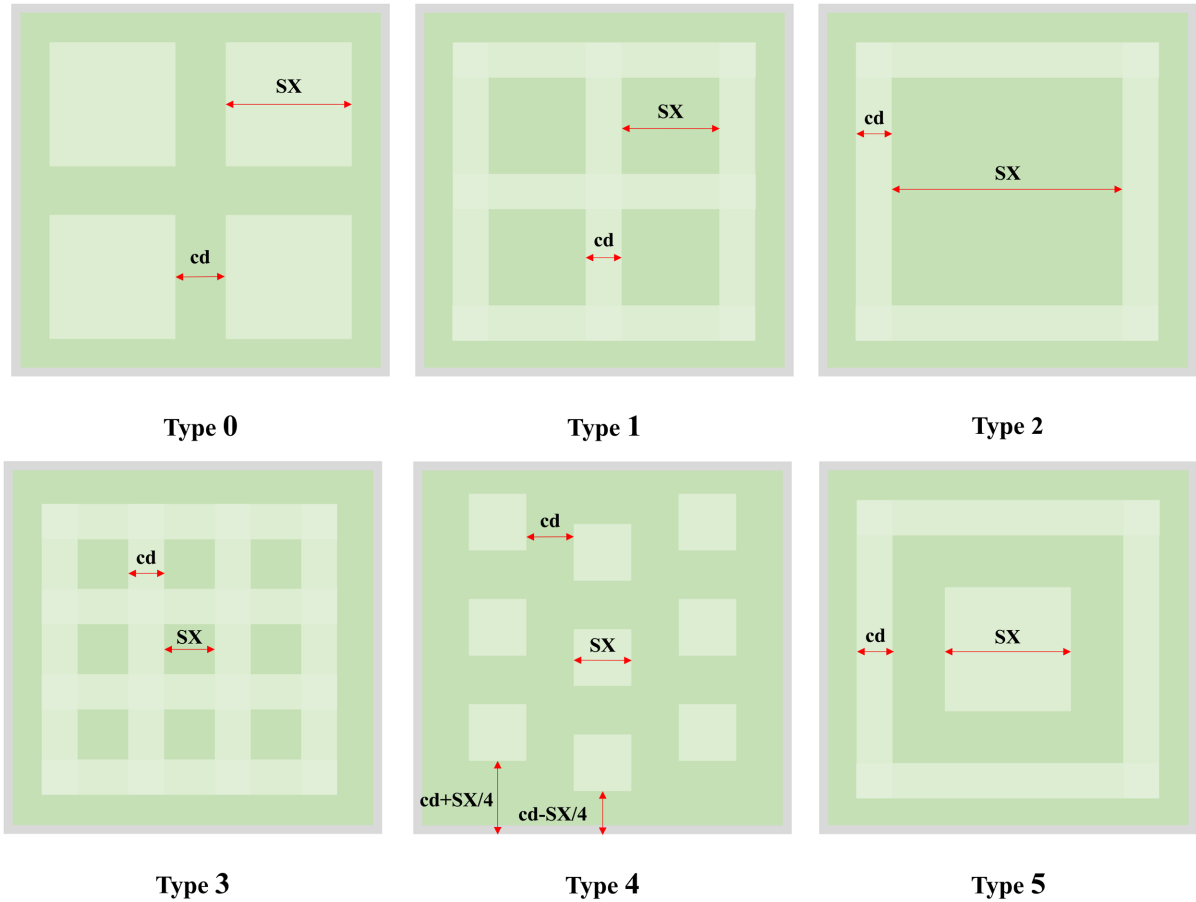


Figure 4. Diagram of the profile structure for 2.79 um pixel unite of 55 nm BSI  
 图 4. 55 nm BSI 2.79 um 像素单元结构剖面图



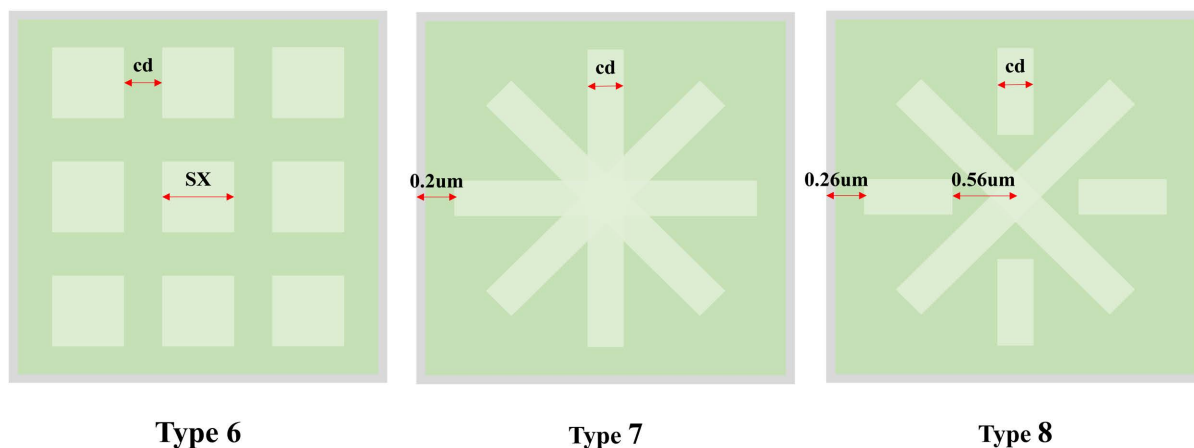


Figure 5. Diagram of the 9 types CDTI graphic structure schemes  
图 5. 9 种 CDTI 图形结构方案示意图

### 3.3. 输入条件设定

- 1) 仿真区域包含 4 个像素，无微透镜(Micro Lens, ML)和彩色滤镜(Color Filter, CF);
- 2) 仿真区域边界条件分别设置为, x, y 方向均为布洛赫(Bloch), z 方向为理想匹配层 PML (Perfectly Matched Layers, PML);
- 3) 仿真光源为平面波光源，采用单色光，波长为 850 nm 和 940 nm。

### 3.4. 输出条件设定

仿真输出条件的设定需要结合仿真研究对象及仿真目的进行设定，本文主要研究近红外波段，因此输出时选择了最广泛使用的 850 nm 和 940 nm 两个波长，与此同时仿真输出的条件还考虑到了工艺的可生产性。55 nm BSI 工艺生产要求 CDTI 图形尺寸(例如 Type0 的 SX 值或 Type3 的 cd 值)大于 0.1  $\mu\text{m}$ , CDTI 和 CDTI 之间的间距(例如 Type0 的 cd 值或 Type3 的 SX 值)大于 0.09  $\mu\text{m}$ , 因此结合 Type0 到 Type8 九种图形的各自特征，每种图形仿真输出的 SX 值并不完全相同，SX 值分布范围从最小的  $a_x/12$  ( $a_x$  是像元尺寸，本文中为 2  $\mu\text{m}$  或 2.79  $\mu\text{m}$ )到最大的  $a_x/2$ ，但均满足工艺生产要求。综上所述，仿真输出结果选用了 850 nm、940 nm 两种波长，计算了 9 种不同图形不同 SX 值对应的 QE 值。

## 4. 仿真结果与分析

### 4.1. 2 $\mu\text{m}$ 像素单元 CDTI 结构

2  $\mu\text{m}$  像素单元 CDTI 结构 QE 值仿真结果如表 1 所示。

结果显示，在 2  $\mu\text{m}$  像素单元 9 种 CDTI 图形结构共 45 组仿真结果中，850 nm、940 nm 入射光对应的最高 QE 来自于 CDTI 图形 Type1、尺寸  $SX = a_x/4$ ，其 850 nm 波长的 QE 达到 47.7%，940 nm 波长的 QE 达到 35.6%，具体来说，此时的 CDTI 和 CDTI 之间的间距  $SX = 2/4 = 0.5 \mu\text{m}$ ，CDTI 的尺寸  $cd = (2 - 0.13 - 0.5 \times 2)/5 = 0.174 \mu\text{m}$ 。45 组仿真结果中，850 nm、940 nm 入射光对应的最低 QE 来自于 CDTI 图形 Type4、尺寸  $SX = a_x/6$ ，其 850 nm 波长的 QE 仅 26.2%，940 nm 波长的 QE 仅 16.6%，具体来说，此时 CDTI 的尺寸  $SX = 2/6 = 0.333 \mu\text{m}$ ，CDTI 和 CDTI 之间的间距  $cd = (2 - 0.13 - 0.333 \times 3)/4 = 0.2175 \mu\text{m}$ 。可见，通过仿真设计选择出优秀的 CDTI 图形结构设计可以将 QE 提升近 1 倍。

CDTI 结构是在衬底硅层中从衬底硅层表面向下挖出的深度 0.4  $\mu\text{m}$  沟槽，即制作 CDTI 结构的区域其衬底硅层会有深度达 0.4  $\mu\text{m}$  的硅损失。通过引言部分的介绍我们可得知两点：第一，衬底硅层即光子吸

收层，其厚度越厚，QE 越高，硅层损失则会降低其 QE；第二，CDTI 结构调节了光在硅衬底上下表面的反射和透射，使得入射光在衬底硅层中的有效吸收长度增加，提高 QE。综上所述，可以定义 CDTI 结构导致硅损失引起的 QE 损失为  $QE(\text{loss})$ ，CDTI 结构增加硅层有效吸收长度引起的 QE 增加为  $QE(\text{increase})$ ， $QE(\text{increase}) - QE(\text{loss})$  的值越大，该设计结构、尺寸的 QE 越大。

**Table 1.** The simulation results of QE value for CDTI structure of 2  $\mu\text{m}$  pixel  
**表 1.** 2  $\mu\text{m}$  像素单元 CDTI 结构 QE 值仿真结果

	wavelength\SX	ax/2.5	ax/4	ax/5	ax/6	ax/10
Type0	850 nm	27.6%	33.6%	35.8%	34.2%	31.2%
	940 nm	18.5%	23.5%	24.6%	24.1%	22.6%
	wavelength\SX	ax/3	ax/4	ax/5	ax/6	ax/7
Type1	850 nm	45.4%	47.7%	45.9%	42.5%	41.3%
	940 nm	33.3%	35.6%	34.6%	31.8%	30.2%
	wavelength\SX	ax/1.5	ax/2	ax/2.5	ax/3	ax/4
Type2	850 nm	37.7%	36.7%	34.7%	34.0%	33.1%
	940 nm	26.0%	25.0%	24.0%	23.1%	21.7%
	wavelength\SX	ax/5	ax/6	ax/7	ax/8	ax/9
Type3	850 nm	43.1%	45.1%	46.6%	45.4%	43.0%
	940 nm	31.6%	33.3%	34.3%	32.9%	30.6%
	wavelength\SX	ax/6	ax/7	ax/8	ax/9	ax/10
Type4	850 nm	26.2%	30.1%	33.8%	36.6%	35.7%
	940 nm	16.6%	20.0%	22.5%	24.9%	25.5%
	wavelength\SX	ax/2	ax/4	ax/5	ax/6	ax/7
Type5	850 nm	33.6%	39.6%	40.8%	40.3%	39.7%
	940 nm	23.4%	28.4%	30.5%	29.6%	29.5%
	wavelength\SX	ax/6	ax/7	ax/8	ax/9	ax/10
Type6	850 nm	26.1%	30.3%	33.1%	36.5%	35.2%
	940 nm	16.2%	20.3%	22.0%	24.9%	25.8%
	wavelength\cd	ax/8	ax/9	ax/10	ax/11	ax/12
Type7	850 nm	32.0%	31.4%	29.7%	28.1%	26.4%
	940 nm	21.2%	20.7%	19.9%	17.8%	15.9%
	wavelength\cd	ax/8	ax/9	ax/10	ax/11	ax/12
Type8	850 nm	33.4%	32.1%	30.2%	29.2%	27.7%
	940 nm	22.4%	21.7%	20.3%	19.1%	16.9%

以 Type0 为例，其 CDTI 尺寸即 SX 值，随着 CDTI 尺寸的增大，其 QE 值呈现先增大后减小的趋势。CDTI 尺寸越大， $QE(\text{loss})$  越大，说明对于 Type0 的 5 种尺寸来说，当  $SX = ax/5$  时， $QE(\text{increase}) - QE(\text{loss})$  值最大。对比  $SX = ax/2.5$  和  $SX = ax/10$ ，可见  $ax/10$  的 QE 值更高，当  $SX = ax/2.5$  时，CDTI 尺寸为 0.8  $\mu\text{m}$ ，CDTI 和 CDTI 间距仅 0.09  $\mu\text{m}$ ，可以近似为无 CDTI 结构的 2.6  $\mu\text{m}$  厚度硅层，而  $SX = ax/10$  时，CDTI 尺寸仅为 0.2  $\mu\text{m}$ ，近似为无 CDTI 结构的 3  $\mu\text{m}$  厚度硅层，3  $\mu\text{m}$  比 2.6  $\mu\text{m}$  硅厚的 QE 值更高是合理的。

Type1 的  $SX = ax/4$  的 QE 值最高，其另外 4 种尺寸的 QE 值也均不低。这 5 种尺寸的 CDTI 尺寸范

围为 0.107  $\mu\text{m}$ ~0.26  $\mu\text{m}$ ，对比其他结构来说该尺寸较小，对硅层的损失较低，即 QE(loss)值较小，推测这种规整的网格型结构可以较优异的增加入射光在硅衬底的反射、透射，即 QE(increase)值较大，因此其 QE 值整体较高。

Type3 和 Type1 比较类似，也是规整的网格型结构，其 5 种尺寸的 QE 值仅次于 Type1，推测其 QE(increase)值和 Type1 一样也较大，但因为其 CDTI 区域较 Type1 略微增加，导致 QE(loss)较 Type1 有所增加，因此其 QE 值整体略低于 Type1。其他 Type 各尺寸的 QE 数值均可以按以上理论分析来解释，通过对比 Type6 和 Type4 的 QE 值几乎一致，可见对于 Type6 这种 CDTI 设计结构，其 CDTI 区域是否做偏移对 QE 值几乎没有影响。

#### 4.2. 2.79 $\mu\text{m}$ 像素单元 CDTI 结构

2.79  $\mu\text{m}$  像素单元 CDTI 结构 QE 值仿真结果如表 2 所示。

**Table 2.** The simulation results of QE value for CDTI structure of 2.79  $\mu\text{m}$  pixel  
**表 2.** 2.79  $\mu\text{m}$  像素单元 CDTI 结构 QE 值仿真结果

	wavelength\SX	ax/2.5	ax/4	ax/5	ax/6	ax/10
Type0	850 nm	31.7%	37.2%	39.8%	38.1%	35.4%
	940 nm	22.8%	27.8%	28.4%	28.0%	26.6%
	wavelength\SX	ax/3	ax/4	ax/5	ax/6	ax/7
Type1	850 nm	49.6%	51.4%	49.9%	46.3%	45.6%
	940 nm	37.5%	39.6%	38.8%	35.8%	34.7%
	wavelength\SX	ax/1.5	ax/2	ax/2.5	ax/3	ax/4
Type2	850 nm	41.3%	40.9%	38.8%	38.2%	37.3%
	940 nm	30.3%	29.3%	28.3%	27.3%	24.8%
	wavelength\SX	ax/5	ax/6	ax/7	ax/8	ax/9
Type3	850 nm	49.9%	52.1%	53.6%	51.8%	50.1%
	940 nm	37.7%	40.3%	41.3%	39.9%	38.6%
	wavelength\SX	ax/6	ax/7	ax/8	ax/9	ax/10
Type4	850 nm	30.4%	34.8%	37.9%	40.9%	40.1%
	940 nm	20.8%	24.3%	26.5%	29.1%	28.5%
	wavelength\SX	ax/2	ax/4	ax/5	ax/6	ax/7
Type5	850 nm	37.9%	43.2%	45.2%	44.3%	43.2%
	940 nm	27.8%	32.4%	34.5%	33.5%	33.1%
	wavelength\SX	ax/6	ax/7	ax/8	ax/9	ax/10
Type6	850 nm	30.3%	34.6%	37.3%	40.8%	39.4%
	940 nm	20.4%	24.6%	26.0%	28.8%	29.8%
	wavelength\cd	ax/8	ax/9	ax/10	ax/11	ax/12
Type7	850 nm	36.4%	35.7%	33.9%	32.5%	30.8%
	940 nm	25.4%	24.8%	23.9%	21.9%	20.6%
	wavelength\cd	ax/8	ax/9	ax/10	ax/11	ax/12
Type8	850 nm	37.8%	36.3%	34.6%	33.5%	31.9%
	940 nm	26.5%	25.8%	24.7%	23.5%	20.9%



结果显示, 在 2.79  $\mu\text{m}$  像素单元 9 种 CDTI 图形结构共 45 组仿真结果中, 850 nm、940 nm 入射光对应的最高 QE 来自于 CDTI 图形 Type3、尺寸  $SX = ax/7$ , 其 850 nm 波长的 QE 达到 53.6%, 940 nm 波长的 QE 达到 41.3%, 具体来说, 此时的 CDTI 和 CDTI 之间的间距  $SX = 2.79/7 = 0.4 \mu\text{m}$ , CDTI 的尺寸  $cd = (2.79 - 0.13 - 0.4 \times 3)/6 = 0.243 \mu\text{m}$ 。45 组仿真结果中, 850 nm、940 nm 入射光对应的最低 QE 来自于 CDTI 图形 Type6、尺寸  $SX = ax/6$ , 其 850 nm 波长的 QE 仅 30.3%, 940 nm 波长的 QE 仅 20.4%, 具体来说, 此时 CDTI 的尺寸  $SX = 2.79/6 = 0.465 \mu\text{m}$ , CDTI 和 CDTI 之间的间距  $cd = (2.79 - 0.13 - 0.465 \times 3)/4 = 0.2 \mu\text{m}$ 。可见, 对于 2.79  $\mu\text{m}$  像素单元, 通过仿真设计选择出优秀的 CDTI 图形结构设计同样可以将 QE 提升近 1 倍。

对于 2.79  $\mu\text{m}$  像素单元 QE 仿真结果, 其理论依据和 2  $\mu\text{m}$  像素单元基本一致: 定义 CDTI 结构导致硅损失引起的 QE 损失为  $QE(\text{loss})$ , CDTI 结构增加硅层有效吸收长度引起的 QE 增加为  $QE(\text{increase})$ ,  $QE(\text{increase}) - QE(\text{loss})$  的值越大, 该设计结构、尺寸的 QE 越大。

2.79  $\mu\text{m}$  像素单元各 Type、尺寸的 QE 值比 2  $\mu\text{m}$  像素单元均增加约 4%, 主要是因为 2.79  $\mu\text{m}$  采用的硅层厚度是 3.5  $\mu\text{m}$ , 比 2  $\mu\text{m}$  像素单元采用的 3  $\mu\text{m}$  硅层厚度增加了 0.5  $\mu\text{m}$ , 理解为  $QE(\text{increase})$  增加而  $QE(\text{loss})$  基本不变, 因此其各 Type、各尺寸 QE 均有所增加。

2.79  $\mu\text{m}$  像素单元各 Type、尺寸间 QE 趋势和 2  $\mu\text{m}$  像素单元基本一致, 最优的 2 种结构也是 Type1 和 Type3, 区别仅在于 2.79  $\mu\text{m}$  的 Type3 要略优于 Type1 而 2  $\mu\text{m}$  的则是 Type1 略优于 Type3, 但其实无论对于 2  $\mu\text{m}$  还是 2.79  $\mu\text{m}$  像素单元, Type1、3 之间的 QE 值差异都不大, 可以得出的结论是, 对于 2  $\mu\text{m}$ 、2.79  $\mu\text{m}$  像素单元, 规整的网格型结构均可以较优异的增加入射光在硅衬底的反射、透射, 较好的增加  $QE(\text{increase})$  值, 提高整体 QE 值。

## 5. 结论

本文基于 55 nm BSI-CIS 工艺, 针对 2  $\mu\text{m}$  和 2.79  $\mu\text{m}$  像素单元, 通过对 850 nm、940 nm 波长不同 CDTI 图形结构的 QE 值进行仿真, 得到了各自近红外吸收效率最高的 CDTI 图形结构。其中, 在 2  $\mu\text{m}$  像素单元 9 种 CDTI 图形结构中, 850 nm、940 nm 入射光对应的最高 QE 来自于 CDTI 图形 Type1、尺寸  $SX = ax/4$ , 其 850 nm 波长的 QE 达到 47.7%, 940 nm 波长的 QE 达到 35.6%; 在 2.79  $\mu\text{m}$  像素单元 9 种 CDTI 图形结构中, 850 nm、940 nm 入射光对应的最高 QE 来自于 CDTI 图形 Type3、尺寸  $SX = ax/7$ , 其 850 nm 波长的 QE 达到 53.6%, 940 nm 波长的 QE 达到 41.3%。上述结构对于改善近红外量子效率效果显著, 为 BSI-CIS 像素设计提供了一定指导依据。

由于本研究是基于仿真结果进行分析, 后续可通过对试验对 CDTI 工艺图形及尺寸对 QE 值的影响做进一步验证。

## 参考文献

- [1] 解析 CMOS 图像传感器技术及未来发展[J]. 电子元器件与信息技术, 2018, 2(3): 45-50.
- [2] 王延超. 微结构硅基近红外材料及其光电特性研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [3] 邵泽旭. 基于表面微结构与深沟道隔离协同的近红外响应增强 CMOS 图像传感器设计[J]. 集成电路应用, 2023, 40(5): 31-33.
- [4] 陈保存. 背照式 CCD/CMOS 光子响应不均匀性与波长关系的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [5] 汪豪. CMOS 图像传感器像元结构设计及优化[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [6] 陈炜. FDTD/MRTD 方法在色散介质中的应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [7] 陈娟, 王建国, 许宁. 弱条件稳定时域有限差分方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.