

## روشهای مختلف کاهش انحرافات ناشی از تغییرات دما در دزیمترهای ماسفت

بهارک اسلامی<sup>۱\*</sup>، جواد بهمنی، فرهاد محمد جعفری

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

### چکیده:

در این مقاله روشهای جدید تصحیح دمایی برای دزیمترهای ماسفت با کانال پی ارائه شده است. نشان داده شده است که با اندازه گیری تغییرات ولتاژ درین سورس برای چندجریان مختلف درین و دانستن مقدار جریان درین مربوط به ضریب دمایی صفر (IZTC) انحراف دمایی ولتاژ درین سورس و یا ولتاژ آستانه به طول قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. عبارات تحلیلی برای تصحیحات دمایی براساس وابستگی خطی پارامترهای وابسته به دما، به صورت تئوری ارائه شده است. نشان داده شده است که ضریب دمایی ولتاژ درین سورس و ولتاژ آستانه به میزان قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. این به معنی کاهش انحراف دمایی برای دزیمتر پیموس می باشد.

**کلیدواژه‌ها:** دزیمتر، ماسفت، تصحیح دمایی، ولتاژ آستانه، بازخوانی دز

## Different methods for reducing deviations due to temperature changes in MOSFET dosimeters

B. Eslami<sup>\*</sup>, J. Bahmani, F. Mohammad Jafari

Department of Physics, Faculty of fundamental science, University of Payame Noor, Tehran, Iran.

### Abstract

In this article, new thermal compensation methods for p-channel MOSFET dosimeters presented. It has shown that by measuring the source-drain voltage shifts for different drain currents and knowing the value of the zero-temperature coefficient drain current, IZTC, the thermal drift of source-drain or threshold voltages can significantly reduce. Analytical expressions for the thermal compensation have been theoretically deduce on the base of a linear dependence on temperature of the parameters involved. It has shown that the thermal coefficients of the source-drain voltage and the threshold voltage significantly reduced. This means reducing the temperature deviation for the PMOS dosimeter.

**Keywords:** Dosimeter, MOSFET, Temperature compensation, Threshold voltage, Dose readout

<sup>1</sup> bkeslami@yahoo.com

## ۱. مقدمه

در چند دهه گذشته ماسفتها به دلیل مزایای زیاد آنها از جمله، اندازه کوچکشان در مقایسه با سایر دزیمترها، بازخوانی سریع و غیر مخرب اطلاعات دزیمتری، توان کم مورد نیاز، کالیبراسیون آسان، حساسیت قابل قبول و قابلیت باز تولید، به طور گسترده‌ای به عنوان دزیمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. این ویژگیهای پسندیده ماسفتها استفاده آنها را در زمینه های مختلف از جمله صنایع فضایی، صنایع هسته‌ای، رادیوتراپی، دزیمتری پوست و مونیتورینگ کلینیکی قابل گسترش ساخته است [۲-۴].

تابش یون ساز دارای انرژی کافی برای تولید جفت الکترون حفره در ناحیه اکسید ماسفت می‌باشد. انرژی متوسط لازم برای تولید یک جفت الکترون-حفره در اکسید سیلیکون  $17 \text{ eV}$  می‌باشد. تابش یون ساز باعث ایجاد جفتهای الکترون و حفره در ساختار پیموس می‌شود. این جفتها توسط میدان الکتریکی ایجاد شده در لایه اکسید گیت و نزدیک سطح میانی اکسید گیت و سیلیکون از هم جدا می‌شوند [۵]. آسیب ناشی از تابش در لایه  $\text{SiO}_2$  شامل سه مولفه می‌باشد:

- تجمع بارهای به دام افتاده در اکسید.
- افزایش در تعداد تله‌های میانی (محل اتصال اکسید و بدنه).
- افزایش در تعداد تله‌های داخل اکسید.

در اثر تابش یون ساز جفت الکترون حفره‌ها در داخل لایه  $\text{SiO}_2$  ایجاد می‌شوند یا ممکن است از محل اتصال اکسید و بدنه به داخل  $\text{SiO}_2$  تزریق شوند. این حاملها می‌توانند در عرض چند پیکوثانیه بازترکیب شوند یا از طریق اکسید منتقل شوند. الکترون‌ها در داخل  $\text{SiO}_2$  قابلیت حرکت بالایی دارند و در دمای اتاق برای ضخامت‌های معمول اکسید ( $t_{\text{ox}} < 100 \text{ nm}$ ) بدون اینکه به تله بیافتند به وسیله الکتروود مثبت جمع آوری شده و در مدت چند پیکوثانیه به سمت بیرون جاروب می‌شوند. اما حفره‌ها دارای قابلیت تحرک پایین هستند و احتمال به تله افتادن آنها در اثر عبور در داخل اکسید بسیار زیاد است. به تله افتادن تعدادی از حفره‌ها در داخل اکسید منجر به بار مثبت خالص مجموع می‌شود. حفره‌های دیگر ممکن است به محل اتصال اکسید و سیلیکون حرکت کنند که در آنجا حاملها را گیر اندازی می‌کنند و ایجاد تله‌های میانی می‌کنند.

توانایی ماسفت در پاسخ به تابش را حساسیت می‌گوییم که منظور از پاسخ تغییر ولتاژ آستانه است و با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$s = \frac{\Delta V_{\text{th}}}{D} \quad (1)$$

که در آن  $D$  دز جذب شده می‌باشد. تفاوت در ضخامت لایه اکسید سبب ایجاد حساسیت‌های مختلفی می‌شود. پرتودهی پیموسها می‌تواند بدون اعمال ولتاژ خارجی (حالت بدون بایاس) و یا با اعمال ولتاژ خارجی بین گیت و بدنه (حالت بایاس) انجام شود [۶]. در حالت بدون بایاس، میدان الکتریکی فقط به خاطر تفاوت ما بین تابع کار مواد بدنه و گیت می‌باشد. بار انباشته شده در لایه اکسید گیت پیموس، تغییراتی را در پارامترهای الکتریکی آن ایجاد می‌کند که می‌تواند بعد از پرتودهی که بازخوانی نامیده می‌شود، به صورت آزمایشگاهی اندازه گیری شود.

پارامتر الکتریکی ترانزیستور پیموس که اغلب به عنوان پارامتر دزیمتری استفاده می‌شود ولتاژ آستانه نام دارد. ولتاژ آستانه ولتاژ گیت سورس لازم برای ایجاد کانال معکوس بین پایه های سورس و درین می‌باشد. برای ماسفت های با کانال پی، روشهای مختلفی وابستگی تقریباً خطی بین شیفت ولتاژ آستانه و دز جذب شده در اکسید گیت را در رنج دزهای پایین تا حدود ده ها گری را نشان می‌دهند. هنگام باز خوانی دز دریافتی، ولتاژ آستانه می‌تواند با استخراج منحنی مشخصه جریان ولتاژ پیموس به طور کامل و یا استفاده از روشهای دیگر براساس اندازه گیری در جریان ثابت تعیین شود [۷]. روش اندازه گیری متداول بر اساس ثبت ولتاژ درین سورس ترانزیستور در حالت بایاس با یک جریان ثابت درین قبل و بعد از پرتودهی می‌باشد [۸]. در این شرایط، شیفت ولتاژ سورس درین تقریباً برابر با افزایش ولتاژ آستانه می‌باشد.

یکی از مشکلات عمده استفاده از ماسفت ها به عنوان دزیمتر وابستگی مشهور ولتاژ آستانه به دما می‌باشد، که اثر غیر قابل اغمازی است و می‌تواند بازخوانی دز را تحریف کند. پس هنگامی که پیموس به عنوان دزیمتر به کار برده می‌شود

باید تکنیک تصحیح دمایی مناسبی به کار گرفته شود. سه روش برای کاهش اثر تغییرات دما بر روی ولتاژ آستانه پیشنهاد می‌شود:

الف: ارزیابی و کم کردن سهم نسبی افت و خیز دما از داده های بدست آمده، در این روش وابستگی دمایی پارامتر دزیمتری محاسبه می‌شود و مقادیر مربوط به ولتاژ آستانه وقتی که دما تغییر می‌کند، تصحیح می‌شود.  
ب: روش تصحیح دیگر شامل ست کردن جریان درین در نقطه ای است که اثر افت و خیز دما کمترین می باشد و آن مربوط به نقطه با ضریب دمایی صفر می‌باشد. این نقطه ZTC نامیده می‌شود و جریان مربوط به آن با IZTC نشان داده می‌شود.

ج: روش دیگر تصحیحات دمایی شامل اندازه گیری تفاضلی ولتاژ درین سورس دو ماسفت مجزا است. این ترانزیستورها در ولتاژ های گیت سورس متفاوت پرتو دهی شده اند ولی با استفاده از جریان یکسان در طول باز خوانی بایاس می‌شوند. در نتیجه دارای حساسیتهای متفاوت برای تابش می‌باشند و شیفت ولتاژهای درین سورس متفاوتی ایجاد می‌کنند. با این وجود افت و خیز گرمایی در دو ترانزیستور یکسان است و به کاربردن اندازه گیریهای تفاضلی تفاوتها را از بین می‌برد. در مقالات قبلی [۹-۱۰] ما امکان استفاده از پیموسهای ارزان قیمت را به عنوان دزیمتر که به صورت بدون بایاس پرتو دهی شدند و افزایش قابل ملاحظه‌ای در محدوده خطی در مقایسه با سیستمهای مشابه دارند را نشان داده‌ایم. در این مقاله یک روش جدید برای جبران دمایی ولتاژ درین-سورس در اندازه گیری جریان ثابت نه فقط همسو با فرایندهای استاندارد بازخوانی بلکه با افزایش در محدوده خطی را معرفی کرده‌ایم که براساس اندازه‌گیری شیفت ولتاژ سورس درین برای یک جریان اضافی می باشد و این جریانها می تواند متفاوت از IZTC باشند.

اگر چه در این مقاله به دزیمترهای پیموس اشاره کرده‌ایم، توجه به این نکته مهم است که متودولوژی پیشنهاد شده را می توان برای سایر سنسورها بر اساس ماسفتها مانند CMOS و CHEMFET و ISFET که مقدار تحت مطالعه از ولتاژ آستانه استخراج می شود، به کار برد. در این موارد ولتاژ آستانه همچنان در جریان ثابت درین اندازه گیری شده است.

## ۲. روشهای تصحیح دما

هنگام باز خوانی دز تحت بایاس جریان درین ثابت، پایه های گیت و درین ماسفت معمولا اتصال کوتاه شده و به زمین وصل می‌باشند و بدنه و سورس نیز از داخل به هم متصلند. در این شرایط ترانزیستور در ناحیه اشباع کار می‌کند و منحنی مشخصه پیموس  $I_D - V_S$  با معادله ۲ بیان می‌شود.

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_S - |V_T|)^2 \quad (2)$$

### ۲.۱. مدلسازی دمایی ولتاژها در جریان درین ثابت:

در اغلب سیستم های دزیمتری ماسفت، دز تابش- از شیفت ولتاژ آستانه " که به عنوان پارامتر دزیمتری عمل می‌کند " با اندازه گیری ولتاژ درین سورس در جریان ثابت درین، محاسبه شده است. همان طور که در مقدمه نیز بیان شده است، هر گونه انحراف دمایی در طول این فرایندها ولتاژ آستانه را تغییر می دهد، که باعث تخمین بدون دقت دز می‌شود. اولین مرحله در این روش مطالعه وابستگی دمایی ولتاژ سورس و ولتاژ آستانه در جریان ثابت درین می‌باشد. در این مقاله در نظر می‌گیریم که تاثیرات پرتو دهی و دما، روی ولتاژ آستانه و ولتاژ سورس تصحیح نشده است. فرض می‌کنیم که وابستگی دمایی ولتاژ آستانه می‌تواند با مدل خطی متداول مدلسازی شود:

$$\Delta |V_T| = \Delta |V_T^0| + \alpha_{|V_T|} \Delta T \quad (3)$$

مدل خطی ارائه شده در معادله ۳، برای هر بازه تغییرات دمایی دلخواهی همچنان معتبر و برقرار است. به طور مشابه وابستگی دمایی ولتاژ سورس در جریان ثابت درین نیز توسط تقریب خطی مدلسازی شده است:

$$\Delta V_S = \Delta V_S^0 + \alpha(I_D)\Delta T \quad (۴)$$

در ادامه، ما این ضرایب دمایی را با استفاده از مشخصه های الکتریکی ترانزیستور، به منظور یافتن معادله ای برای محاسبه پارامترهای دزیمتری که شامل جبران دمایی است، مشخص می‌کنیم. شیفت ولتاژ آستانه می‌تواند از شیفت های ولتاژ سورس در دو جریان مختلف بدست آید:

$$\Delta|V_T| = \Delta V_{S1} + \frac{\Delta V_{S2} - \Delta V_{S1}}{1 - \sqrt{\frac{I_{D2}}{I_{D1}}}} \quad (۵)$$

بر اساس معادله ۴ برای جریانهای  $I_{D1}$  و  $I_{D2}$  داریم:

$$\begin{aligned} \Delta V_{S1} &= \Delta V_{S1}^0 + \alpha(I_{D1})\Delta T \\ \Delta V_{S2} &= \Delta V_{S2}^0 + \alpha(I_{D2})\Delta T \end{aligned} \quad (۶)$$

و با جایگذاری در معادله ۵ بدست می‌آوریم:

$$\Delta|V_T| = \left( \Delta V_{S1}^0 + \frac{\Delta V_{S2}^0 - \Delta V_{S1}^0}{1 - \sqrt{\frac{I_{D2}}{I_{D1}}}} \right) + \left( \alpha(I_{D1}) + \frac{\alpha(I_{D2}) - \alpha(I_{D1})}{1 - \sqrt{\frac{I_{D2}}{I_{D1}}}} \right) \Delta T \quad (۷)$$

با مقایسه معادله ۳ و ۷:

$$\alpha_{|V_T|} = \alpha(I_{D1}) + \frac{\alpha(I_{D2}) - \alpha(I_{D1})}{1 - \sqrt{\frac{I_{D2}}{I_{D1}}}} \quad (۸)$$

اگر معادله ۸ را برای جریان دلخواه  $I_{D1} = I_D$  و  $I_{D2} = I_{ZTC}$  در نظر بگیریم، برای ضرایب دمایی ولتاژ سورس خواهیم داشت:

$$\alpha(I_D) = \alpha_{|V_T|} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{ZTC}}} \right) \quad (۹)$$

زیرا  $\alpha(I_{ZTC}) = 0$  می‌باشد. اگر ضریب دمایی ولتاژ آستانه و  $I_{ZTC}$  شناخته شده باشند، مقدار ضریب دمایی ولتاژ سورس برای هر جریان درین را می‌توان محاسبه نمود. معادله ۹ به ما امکان تعیین جبران دمایی ولتاژ سورس در جریان ثابت درین را می‌دهد.

## ۲.۲. تصحیح دمایی شیفت ولتاژ سورس: روش دو جریان

برای به دست آوردن شیفت ولتاژ سورس تصحیح شده دمایی جریان درین در  $I_{D1}$ ، جریان درین اضافی دیگر،  $I_C$  مطرح می‌شود. معادله ۴ را می‌توان برای ارزیابی افزایش ولتاژ سورس اندازه گیری شده در  $I_{D1}$  و  $I_C$  به کار برد:

$$\Delta V_{S1} = \Delta V_{S1}^0 + \alpha(I_{D1})\Delta T \quad (۱۰)$$

$$\Delta V_{SC} = \Delta V_{SC}^0 + \alpha(I_C)\Delta T$$

در نتیجه برای  $\Delta T$  داریم:

$$\Delta T = \frac{(\Delta V_{SC} - \Delta V_{S1}) - (\Delta V_{SC}^0 - \Delta V_{S1}^0)}{\alpha(I_C) - \alpha(I_{D1})} \quad (۱۱)$$



از معادله ۲ می‌توان نشان داد که اگر تغییر ایجاد شده در بتا توسط تابش را بتوان نادیده گرفت، شیفت ولتاژ آستانه به خاطر تابش  $\Delta|V_T^0|$  برابر با شیفت ولتاژ سورس می‌باشد  $\Delta V_S^0$ ،

$$\Delta|V_T^0| \cong \Delta V_S^0 \quad (۱۲)$$

با ارزیابی معادله ۱ برای  $I_{D1}$  و  $I_C$ :

$$\Delta|V_T^0| \cong \Delta V_S^0 \cong \Delta V_{S_C}^0 \quad (۱۳)$$

برای  $\Delta T$  داریم،

$$\Delta T = \frac{\Delta V_{S_C} - \Delta V_{S_1}}{\alpha(I_C) - \alpha(I_{D1})} \quad (۱۴)$$

با استفاده از معادله ۱۰، خواهیم داشت:

$$\Delta V_{S_1}^0 = \Delta V_{S_1} + \frac{\Delta V_{S_C} - \Delta V_{S_1}}{1 - \frac{\alpha(I_C)}{\alpha(I_{D1})}} \quad (۱۵)$$

با ارزیابی معادله ۹ برای  $I_{D1}$  و  $I_C$  نسبت  $\frac{\alpha(I_C)}{\alpha(I_{D1})}$  را می‌توان بدست آورد. و با جایگذاری آن در ۱۵، شیفت ولتاژ سورس تصحیح شده به طور دمایی رامی‌توان به عنوان تابعی از اندازه‌های الکتریکی که می‌توان به آسانی اندازه‌گیری نمود را بدست آورد.

$$\Delta V_{S_1}^0 = \Delta V_{S_1} + (\Delta V_{S_C} - \Delta V_{S_1}) \frac{\sqrt{I_{D1}} - \sqrt{I_{ZTC}}}{\sqrt{I_{D1}} - \sqrt{I_C}} \quad (۱۶)$$

پس برای ارزیابی معادله ۱۶، لازم است که افزایش ولتاژ سورس در دو جریان را با دانستن جریان  $I_{ZTC}$  از قبل، اندازه‌گیری کنیم. در هر جا که معادله ۱۲ قابل قبول باشد، شیفت ولتاژ آستانه با جبران دمایی را می‌توان از معادله ۱۶ محاسبه نمود.

### ۳.۲. تصحیح دمایی شیفت ولتاژ آستانه: روش سه جریان

در دزهای پایین و یا در حالت بایاس، یک روش متداول در دزیمتری تجربی صرفنظر کردن از سهم افزایش ولتاژ سورس به خاطر تغییر در پارامتر بتا می‌باشد. با این وجود با در نظر گرفتن اثر  $\beta$ ، محدوده رفتار خطی می‌تواند افزایش یابد. مطابق معادله ۵، شیفت ولتاژ آستانه را می‌توان از ولتاژ افزایش یافته اندازه‌گیری شده با دو جریان مختلف، با جداسازی سهم شیفت ولتاژ سورس به خاطر  $\Delta\beta$  و  $\Delta|V_T|$  به دست آورد. با استفاده از جریان سوم، روش تصحیح دمایی و گسترش ناحیه خطی به طور همزمان می‌تواند انجام شود. برای ارزیابی معادله ۵ دو جریان مورد نیاز است،  $I_{D1}$  و  $I_{D2}$  و جریان اضافی دیگر  $I_C$  برای جبران دمایی شیفت ولتاژ سورس اندازه‌گیری شده در  $I_{D1}$  و  $I_{D2}$  مورد نیاز است. با استفاده از معادله ۱۴، برای  $I_{D1}$  و  $I_{D2}$  خواهیم داشت:

$$\Delta V_{S_1}^0 = \Delta V_{S_1} + (\Delta V_{S_C} - \Delta V_{S_1}) \frac{\sqrt{I_{D1}} - \sqrt{I_{ZTC}}}{\sqrt{I_{D1}} - \sqrt{I_C}} \quad (۱۷)$$

$$\Delta V_{S_2}^0 = \Delta V_{S_2} + (\Delta V_{S_C} - \Delta V_{S_2}) \frac{\sqrt{I_{D1}} - \sqrt{I_{ZTC}}}{\sqrt{I_{D2}} - \sqrt{I_C}}$$

از طرفی مطابق معادله ۵ داریم:

$$\Delta|V_T^0| = \Delta V_{S_1}^0 + \frac{\Delta V_{S_2}^0 - \Delta V_{S_1}^0}{1 - \frac{I_{D2}}{I_{D1}}} \quad (۱۸)$$

اکنون دیگر اساس، ارزیابی معادلات ۱۷ و ۱۸ به ترتیب می‌باشد. که روشهای جبران دمایی و افزایش رفتار خطی را ممکن می‌سازد و شیفت ولتاژ آستانه جبران شده دمایی از افزایش ولتاژ سورس اندازه گیری شده برای ۳ جریان مختلف را فراهم می‌کند. فقط لازم است که  $I_{ZTC}$  و جریانهای استفاده شده برای بایاس ترانزیستور هنگام باز خوانی را بدانیم. به طور خلاصه مطابق این محاسبات، سه جریان لازم داریم تا کاهش رفتار خطی را به خاطر تغییر در بتا و به طور مشابه تصحیحات دمایی را انجام دهیم و دو جریان لازم داریم اگر یکی از این دو اثر را بخواهیم کاهش دهیم. اگر یکی از جریانها،  $I_{D1}$  و یا  $I_{D2}$  برابر  $I_{ZTC}$  باشد، معادله ۱۸ ساده می‌شود. برای مثال اگر  $I_{D2}=I_{ZTC}$ ، شیفت ولتاژ سورس در  $I_{D2}$  به طور دمایی جبران شده است و آنچه که باقی مانده است، ارزیابی معادله ۱۸ برای  $\Delta V_C$  و  $\Delta V_{C1}$  برای یافتن  $\Delta V_{S1}^0$  می‌باشد.

### ۳. نتیجه‌گیری

این مقاله روشهای جدید تصحیح دمایی را برای ترانزیستورهای پیموس با بازخوانی دز بر اساس جریان درین ثابت ارائه می‌دهد. با اندازه گیری شیفت ولتاژ درین سورس برای دو جریان درین مختلف و دانستن مقدار انحراف دمایی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این اگر شیفت ولتاژ درین سورس برای جریان درین سوم اندازه گیری شود مقدار تصحیح شده دمایی با افزایش محدوده خطی به طور مشابه بدست می‌آید. همچنین روشهای توصیف شده در این مقاله، کاهش انحراف دمایی قابل مقایسه ای را نسبت به سایر استراتژی های تکنولوژی یا محاسباتی فراهم می‌کند و می‌تواند در سنسورهای دزیمتری بسیار ساده و کم قیمت به کار برده شود.

### ۴. مراجع

- ۱: Soubra M, Cygler J and Mackay G, Evaluation of a dual bias metal oxide-silicon semiconductor field effect transistor detector as radiation dosimeter, *Med. Phys.* **21**, 567–72 (1994).
- ۲: Kwan I S et al. Skin dosimetry with new MOSFET detectors *Radiat. Meas.* **43** 929–32 (2008).
- ۳: Haran A et al. David D and Barak J, Temperature effects and long term fading of implanted and unimplanted gate oxide RADFETs *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **5** 2917–21(2004).
- ۴: Best S, Ralson A and Suchowerska N, Clinical application of the One Dose™ patient dosimetry system for total body irradiation *Phys. Med. Biol.* **50** 5909–19 (2005).
- ۵: Schwank, J.R et al. Radiation effects in MOS oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55**. Silvaco (Ed.), 2012. ATLAS User's Manual. Santa Clara, United States (2008).
- ۶: Sarrabayrouse and Siskos S, Radiation dose measurement using MOSFETs *IEE Instrum. Meas. Mag.* **1** 26–34 (1998).
- ۷: Carvajal M A et al. Readout techniques for linearity and resolution improvements in MOSFET dosimeters *Sensors Actuators A* **157** 178–84 (2010).
- ۸: Asensio L J et al. Evaluation of a low-cost commercial MOSFET as radiation dosimeter *Sensors Actuators A* **125** 288–95 (2006).
- ۹: B. Eslami and A. J. Bahmani, F. Mohammad Jafari, in: Proceedings of papers-24-nuclure-conference-Esfahan-Iran 1396, P.1060 1396 (in Persian)
- ۱۰: B. Eslami and A. J. Bahmani, F. Mohammad Jafari, in: Proceedings of papers-24-nuclure-conference-Esfahan-Iran 1396, P.1064 (in Persian)