



طراحی، شبیه سازی و ساخت آشکارساز فرابنفش شانه ای

مبتنی بر اکسیدسرب

امیر دوامی^۱

Design, Simulation and Fabrication of PbO-based Interdigitated UV Photodetector

Amir Davami

Email: ad.davami@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، آشکارساز فرابنفش شانه ای مبتنی بر اکسید سرب طراحی، شبیه سازی و ساخت شده است. برای این منظور، از ماده ی اکسید سرب، به خاطر شکاف انرژی مناسب، استفاده گردید. تاکنون از این ماده در این محدوده ی طیفی استفاده نشده است. بررسی ساختار باندهای، در ماده اکسید سرب بانرم افزار Castep Materials Studio انجام شد. بیشینه مقدار نمودار جذب ماده اکسید سرب حاصل از شبیه سازی 250nm حاصل شد که در مقایسه با طیف حاصل از دستگاه طیفسنجی که بیشینه مقدارش 235nm بود نشان داد این ماده برای آشکارسازی در این محدوده مناسب است. در نهایت به ساخت آشکارساز اقدام گردید. جریان تاریکی و جریان تحت تابش نور آشکارساز ساخته شده، در ولتاژهای مختلف اندازه گیری و حساسیت آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج، بیانگر این مطلب است که آشکارساز ساخته شده در ناحیه فرابنفش پاسخ های مناسبی حاصل کرده است.

کلمات کلیدی

آشکارساز نوری، اشعه فرابنفش، ساختار شانه ای، اکسید سرب.

۱. مقدمه

آشکارساز افزاره ای است که سیگنال اپتیکی را به طریق الکترونیکی آشکار می کند. افزایش روز افزون منابع به سمت طول موجهای مادون قرمز و فرابنفش نیاز ما را به آشکارسازهای حساس، پرسرعت و کم نویز افزایش می دهد. [1,2] عملکرد کلی آشکارسازها مبتنی بر سه اصل است: تولید حامل بابر خورد نور، انتقال حامل و یا افزایش بهمنی حامل، دسترسی به حامل و جریان ناشی از آن از طریق پایانه ها. [4,5] علاوه بر تقسیم بندی انجام شده می توانیم آشکارسازها را بر این اساس هم تقسیم بندی کنیم: الف) از لحاظ اپتیکی مثل نحوه گردش نور در آشکارساز (ب) از لحاظ ماده استفاده شده در آن (ج) از لحاظ ویژگی های آشکارسازها مانند سرعت

^۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری

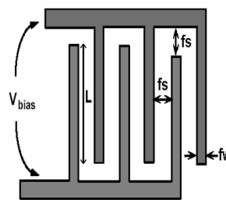


پاسخ، جریان تاریک [1] از دیگر آشکارسازها می‌توان به دیودهای نوری^۱، دیود نوری PIN^۲ دیود نوری بهمنی^۳، آشکارساز فلز نیمه هادی فلز اشاره کرد. آشکارساز فلز نیمه هادی فلز شباهت بسیار زیادی به ساختار شانه ای دارد. بدلیل اینکه همیشه یکی از کنتاکتهای این آشکارساز بصورت معکوس بایاس می‌شود جریان کمتری نسبت به PIN دارد. از دیگر آشکارسازها که بیشتر در مخابرات استفاده می‌شود می‌توان به آشکارسازی با ساختار چندگانه، آشکارساز موج رونده، آشکارساز با کاواک تشدید، آشکارسازهای نقطه کوانتومی و... اشاره کرد، که هر کدام نسبت به دیگری مزایا و معایبی دارد. ماده ی مورد استفاده در برخی آشکارسازها تعیین کننده ی طیف آشکارسازی است. با توجه به اینکه از ترکیب هر ماده ای با اکسیژن اکسید آن ماده حاصل می‌شود، در مورد اکسید سرب نیز باید به این مطلب اشاره شود که در طبیعت واکنش اکسیژن با سرب به چندین صورت رخ می‌دهد که معمول ترین آنها اکسید سرب، دی اکسید سرب و تترا اکسید سرب است. که بر حسب نیاز می‌توان از هر سه استفاده کرد. [10,11]

اکسید سرب، در طبیعت به دو صورت یافت می‌شود؛ ۱. اکسید سرب نوع آلفا، ۲. اکسید سرب نوع بتا؛ در این مقاله خصوصیات ماده ی اکسید سرب تحلیل شده و روابط ساختار شانه ای نیز بررسی شده و نتایج عملی حاصل از ساخت آشکارساز با ماده اکسید سرب ارائه شده است.

۲. بخش نظری

در این بخش برخی از تئوریها و روابط حاکم بر آشکارسازهای مورد نظر در این پژوهش بیان می‌شود. آشکارسازهای ساختار شانه ای کلا از دو الکترود مثبت و منفی تشکیل شده است. در روی هر یک از این الکترودها تعدادی انگشتی به هم جفت شده وجود دارد، در این ساختارها پارامترهایی که بسیار حساس و تاثیر گذار هستند عبارتند از ضخامت انگشتی ها و فاصله انگشتی ها از یکدیگر و طول انگشتی ها، با دقت در پارامترهای مهم آشکارسازها نظیر بازده کوانتومی، پاسخدهی به این تاثیر گذاری پی می‌بریم. با قرار دادن مقادیر مورد نظر بصورت صحیح آشکارساز با راندمان ایده آل حاصل می‌شود. [6,7,8,9]



شکل ۱: ساختار شانه ای و پارامترهای مهم

یکی از روابط مهم در این ساختارها رابطه ی خازنی است :

$$C = \frac{K(k)}{K(k')} \cdot \epsilon_0 \cdot (1 + \epsilon_r) \cdot \left(\frac{A}{f_w + f_s} \right) \quad (1)$$

² -Photo diode

³ -P-intrinsic-n(PIN)

⁴ -Avalanche Photo Diode



در معادله (۱) نسبت $\frac{K(k)}{K(k')}$ از رابطه زیر حاصل می شود:

$$\frac{K(k)}{K(k')} = \frac{1}{2\pi} \cdot \text{Ln} \left[2 \cdot \frac{\sqrt{1+k} + \sqrt[4]{4.k}}{\sqrt{1+k} - \sqrt[4]{4.k}} \right] \quad (۲)$$

$$k = \tan^2 \left[\frac{\pi \cdot f_w}{4 \cdot (f_w + f_s)} \right] \quad (۳)$$

برای بیان مقاومت ساختار هم از رابطه (۵) استفاده می شود

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot c} \quad (۴)$$

در معادله (۱) ϵ_0 که همان ثابت گذردهی فضای آزاد است و برابر $8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ می باشد، ϵ_r نیز همان ثابت گذردهی نسبی می باشد، برای هر ماده متغیر می باشد و برای SiO_2 برابر ۳.۹ است، سایر پارامترها هم به فرار زیر می باشد f_s ، برابر فاصله بین انگشتی ها، f_w برابر ضخامت انگشتی ها و $A=L^2$ می باشد، که L نیز برابر طول انگشتی هاست که در شکل (۱) نشان داده شده است. [7,8,9]

رابطه بازده کوانتومی در این ساختار از رابطه (۵) حاصل می شود:

$$\eta = (1-r) \cdot \left(1 - e^{-\frac{d}{\delta_{\text{OPT}}}} \right) \cdot \frac{f_s}{f_w + f_s} \quad (۵)$$

در رابطه (۵) d برابر با ضخامت لایه ی جاذب، δ_{OPT} برابر عمق نفوذ نور، Γ نیز برابر ضریب بازتاب پذیری می باشد. رابطه زمان گذر نیز بدین صورت قابل بیان است:

$$t_T = \frac{f_s}{2 \cdot V_{\text{sat}}} \quad (۶)$$

در رابطه (۶) نیز V_{sat} سرعت اشباع حامل ها می باشد.

در نهایت رابطه ی پهنای باند را بررسی می کنیم که به صورت معادله (۷) قابل بیان است:

$$BW = \frac{14.17}{f_s} + 0.314 \quad (۷)$$

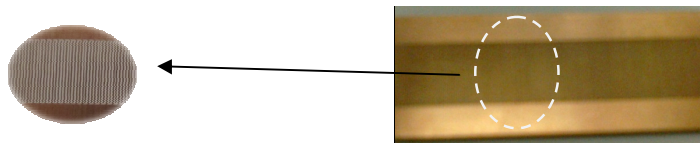
در تمامی روابط مشاهده می کنیم که پارامترهایی چون f_w ، f_s در پارامترهای اساسی آشکارساز بسیار تاثیرگذار است؛ براین اساس ما با انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترها ی f_w ، f_s ، L و انجام محاسبات ریاضی به مقادیری دست یافتیم . برای ایجاد ساختار کریستالی اکسید سرب، بررسی ساختار باندی و همچنین بررسی خواص نوری اکسید از نرم افزار Castep Materials Studio استفاده شده است .

۳. بخش عملی

در این بخش برای ساخت آشکارساز فرابنفش، از بسترهایی از جنس فایبرگلاس استفاده شده است. این بسترها از الکترودهای مسی، که بصورت انگشتی است، تشکیل شده است. انگشتی های مسی ایجاد شده روی این بستر دارای



طول (L) ۱cm، عرض (W) $150\ \mu\text{m}$ ، ضخامت $100\ \text{nm}$ و فاصله بین انگشتان (d) $150\ \mu\text{m}$ هستند که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲: تصویری از بستر آشکارساز با الکترودهای مسی

در این قسمت ابتدا طیف جذبی ماده اکسیدسرب سنتز شده که در شکل ۸ نشان داده شده است را بادستگاه طیف سنجی مرئی-فرابنفش (PG instrument Ltd T70 UV-Vis Spectrometer) بدست آورده و سپس این ماده را بر روی ساختار شانه ای نشانده و نتایج را بررسی کرده ایم.



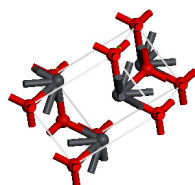
شکل ۳: ماده ی اکسید سرب استفاده شده

۴. یافته ها

در این بخش ،ابتدا نتایج حاصل از تاثیر گذاری تغییر ابعاد ساختار شانه ای بر پارامترهای اساسی آشکارساز را مشاهده نموده و سپس نتایج حاصل از شبیه سازی ماده ی اکسید سرب و در نهایت نتایج حاصل از ساخت آشکارساز فرابنفش را بررسی می کنیم.

۱.۴. بررسی ماده اکسید سرب

با لحاظ کردن ثابت شبکه های مطرح شده و اعمال گروه فضایی ،ساختاری به شکل زیر را بدست می آوریم.



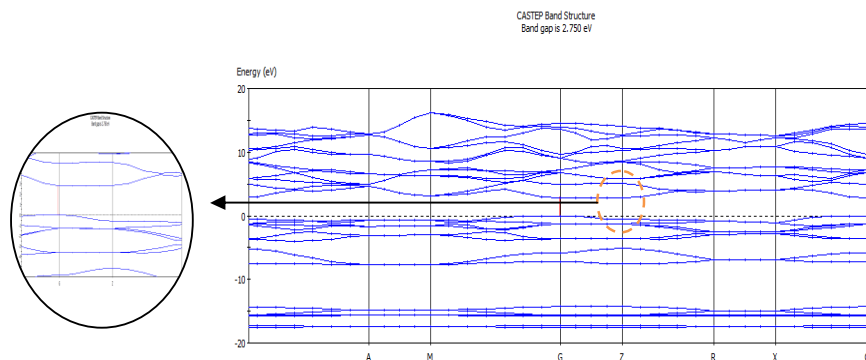
شکل ۴: ساختار اکسید سرب

همان گونه که مشاهده می شود این ساختار دارای ساختار چهارگانه می باشد، در این ساختار اتمهای قرمز رنگ اتمهای اکسیژن و اتمهای خاکستری رنگ اتمهای سرب هستند.



۱.۱.۴ ساختار بانندی

ساختار بانندی ماده اکسید سرب را بادر نظر گرفتن ساختار شکل ۵ با استفاده از نرم افزار castep materials studio بدین صورت خواهیم داشت؛

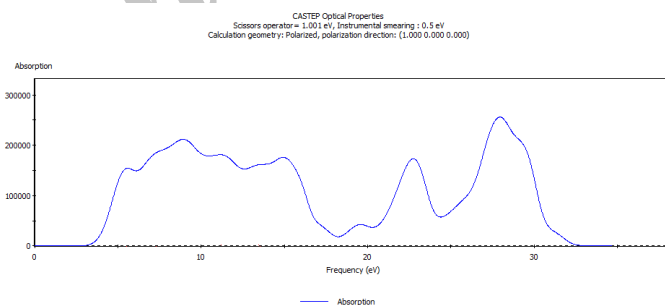


شکل ۵: ساختار بانندی اکسید سرب

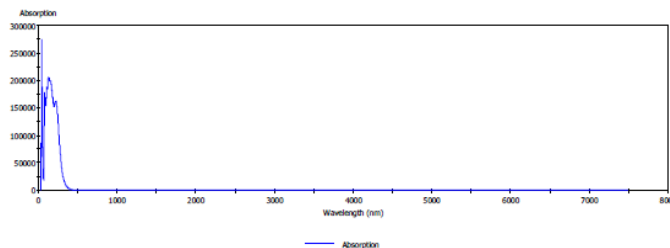
ترازهای پایین تر از صفر الکترون ولت ترازهای باند ظرفیت و ترازهای بالاتر از صفر الکترون ولت ترازهای باند هدایت هستند، برای اینکه ما بتوانیم شکاف انرژی را پیدا کنیم اختلاف بالاترین تراز از باند ظرفیت و پایین ترین تراز از باند هدایت را بدست می آوریم، حال اگر این ترازها در یک امتداد باشند شکاف انرژی مستقیم را خواهیم داشت، در غیر اینصورت یعنی زمانی که در یک امتداد نباشند شکاف انرژی غیر مستقیم حاصل می شود که در شکل بالا با توجه به مطالب گفته شده این ماده دارای شکاف انرژی مستقیم به اندازه ۲.۷۵ الکترون ولت است، که در شکل نیز در نقطه G (که همان دره گاما است) واقع شده است.

۲.۱.۴ جذب ۵

جذب در ماده اکسید سرب را بدین صورت خواهیم داشت؛



شکل ۶: منحنی جذب ماده اکسید سرب بر حسب فرکانس





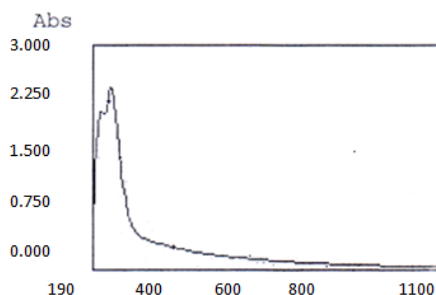
شکل ۷: منحنی جذب ماده اکسید سرب برحسب طول موج

با دقت در شکل ۶ به قله هایی می رسیم که این قله^۶ ها نشاندهنده ی انرژی ها یا همان فرکانس هایی هستند که جذب در آنها رخ داده است، همچنین با دقت در شکل ۷ به این نتیجه می رسیم که بیشینه جذب در ۲۵۰ نانومتری صورت گرفته است.

۲.۴. نتایج حاصل از ساخت آشکارساز ساخته شده از ماده اکسید سرب سنتز شده

۱.۲.۴. بررسی طیف UV-Vis ماده اکسید سرب

طیف UV-Vis ماده اکسید سرب در شکل ۸ مشاهده می شود.



شکل ۸: طیف جذبی اکسید سرب

همانطور که مشاهده می شود بیشینه پیک در طول موج ۲۳۵ نانومتری رخ می دهد که در محدوده ی فرابنفش قرار گرفته و برای این رنج مناسب می باشد. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است در این شکل هم بیشینه پیک در ۲۵۰ نانومتری رخ داده که مقدار این دو شکل تقریباً به هم نزدیک می باشند.

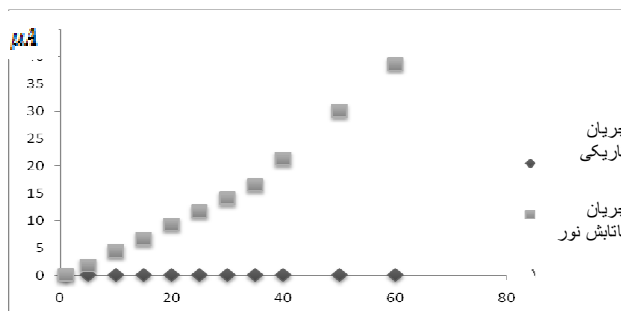
۲.۲.۴. نتایج آشکارساز ساخته شده از ماده اکسید سرب سنتز شده

بعد از آماده کردن شرایط لازم و نشان دادن ماده اکسید سرب بر روی ساختار، در ولتاژهای گوناگون بدون حضور نور و در حضور اشعه فرابنفش جریان های حاصل را بررسی می کنیم،

جدول ۱: نتایج حاصل از ساخت آشکارساز با اعمال ولتاژ در معرض نور و بدون تابش نور

ولتاژ (V)	۱	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۵۰	۶۰
جریان تاریکی (uA)	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۶
جریان با تابش نور (uA)	۰/۰۳	۱/۸۳	۴/۴	۶/۶۶	۹/۳۹	۱۱/۷۸	۱۴/۱۳	۱۶/۶	۲۱/۳۲	۳۰/۱۵	۳۸/۷۱

⁶-peak



شکل ۹: نمودار ولتاژ-جریان آشکارساز مورد نظر

با استفاده از جدول ۱ نموداری بصورت شکل ۹ حاصل می شود.

۳.۲.۴. حساسیت نوری (پاسخ دهی نوری) آشکارساز ساخته شده از ماده اکسید سرب

با دقت در نمودار شکل ۹ و استفاده از روابط حاکم می توان پاسخ دهی نوری آشکارساز را بدست آورد. در این رابطه، توان منبع نوری ۱۳ میکرو وات در نظر گرفته شده است. بعنوان نمونه در چند ولتاژ بررسی می گردد.

جدول ۲: جدول پاسخ دهی نوری

A/W - حساسیت نوری	V-ولتاژ
۱/۰۸	۳۰
۱/۲۷	۳۵

جدول ۲ نشان می دهد آشکارساز، حساسیت نوری نسبتاً خوبی دارد.

۵. بحث و نتیجه گیری

با توجه به مطالب ذکر شده می توان نتیجه گرفت که تغییر f_p و f_c تاثیر بسیار زیادی در BW, R, C می گذارد، بدین صورت که با افزایش f_p ، پهنای باند کاهش می یابد، ظرفیت خازنی کاهش یافته و مقاومت افزایش می یابد؛ این درحالیست که با افزایش f_p ، ظرفیت خازنی افزایش و مقاومت کاهش می یابد. با توجه به نمودار جذب ماده اکسید سرب و طیف جذبی ماده اکسید سرب می توان نتیجه گرفت که در ناحیه فرابنفش مناسب است. پاسخ دهی نوری آشکارساز با توجه به نوع ساختار در حد نسبتاً بالایی قرار دارد. ساخت آشکارساز با این شرایط ساده و کم هزینه بوده و نیاز به تجهیزات پیچیده نداشته است. در این پروژه برای ساخت آشکارساز مورد نظر از بسترهای فایبر گلاس با الکترودهای مسی استفاده شد که از نظر اقتصادی و ساخت بسیار مقرون به صرفه بودند. استفاده از الکترودهای آلومینیومی (Al) بجای الکترودهای مسی در زیر لایه های استفاده شده جهت ساخت آشکارساز می تواند در جهت بهبود عملکرد آشکارساز مؤثر بوده و هم چنین با کنترل ابعاد ماده اکسید سرب استفاده شده می توان عملکرد آشکارساز را بهبود بخشید.



۶. منابع و مراجع

- [1] M. Razeghi and A. Rogalski, (January 1996), *Semiconductor ultraviolet detectors*, Center for Quantum Devices, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Northwestern University
- [2] J.D.Vincent(1990),*fundamentals of infrared detector operation and testing*,Wiley,New York.
- [3] P.W.Kruse,L.D.McGlauchlin,and R.B.McQuistan,(1962),*Elements of infrared Technology*,Wiley,New York,chapters8-10.
- [4] E.L.Dereniak and D.G.Crowe(1984),*Optical Radiation Detectors*,Wiley,New York.
- [5] D.Walker and M.Razeghi (2000),*The development of nitride-based UV photodetectors*, Center for Quantum Devices, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Northwestern University.
- [6] Gregory R. Savich, Rainee N. Simons,(2006), *A Novel, Free-Space Optical Interconnect Employing Vertical-Cavity Surface Emitting Laser Diodes and InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors for Gbit/s RF/Microwave Systems*.
- [7] J.B.D. Soole and H. Schumacher,(1991), "InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors for Long Wavelength Optical Communications," *IEEE Journal of Quantum Electronics*.
- [8] D.L. Rogers, (1991), "Integrated Optical Receivers using MSM Detectors," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 9, No. 12, pp. 1635–1638.
- [9] Yu Ghin Lim and Robert A.Morre ,(1968),*Properties of Alternately Charged Coplanar Parallel Strips by Conformal Mappings*.
- [10] H.J.Terpstra,R.A.de Groot,and C.Hass(1995),*Electronic structure of the lead monoxides:Band-structure calculations and photoelectron spectra*, Materials Science Center,Laboratory of Chemical Physics,University of Groningen.
- [11] J.van den broek,(1966),*Physical Interpretation of a PbO-Photodetector*,Philips research Laboratories,N.V.philips Gloeilampenfabrieken,Eindhoven-Netherlands.