

## کاربردها، مزایا و معایب آشکارسازهای گالیم آرسناید

شهین مرادنسب بدرآبادی<sup>۱\*</sup>، داریوش سرداری<sup>۲</sup>، میترا اطهری<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. عضو هیأت علمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۵)

### چکیده

آشکارسازهای ذرات یا پرتو ابزاری هستند که با آن‌ها ذرات پرانرژی را آشکار، ردیابی یا شناسایی می‌کنند. یکی از این آشکارسازها گالیم آرسناید (GaAs) می‌باشد. مشکلات در تولید لایه‌های ضخیم با دوپینگ (ناخالص سازی یا تغلیظ) به اندازه کافی کم نیاز به عمق‌های تهی سازی کافی (بیشتر از ۱۰۰ میکرومتر) داشت، در حالی که مانع توسعه بیشتر می‌شدند. سپس، علاقه جدیدی به آشکارسازهای برپایه هم مواد حجیم و هم مواد رشد یافته اپیتاکسیالی به وجود آمد. لذا، هدف این مقاله بررسی خصوصیات، کاربردها، مزایا و معایب GaAs بود. عیوب GaAs می‌توانند تحت جنبه‌های ژئومتریال (چند بعدی) یا تحت جنبه‌های منشا ان (نقایص ذاتی و بیرونی) طبقه بندی شود. در استفاده از GaAs به عنوان آشکار ساز پرتو ایکس باید خصوصیات جذب، مقاومت ویژه، تحرک و طول عمر، یکنواختی ماده مورد استفاده در آشکارساز، پایداری عملکرد و قابلیت پردازش را مد نظر قرار داد. انواع آشکارسازهای تصویربرداری GaAs عبارتند از آشکارسازهای مبتنی بر GaAs اپی-تاکسیال، آشکارسازهای مبتنی بر SI-GaAs (جبرانی) و آشکارسازهای مبتنی بر HR-GaAs جبران شده با Cr. یک عملکرد اسپکتروسکوپی خوب، مقادیر CCE بالا و کیفیت تصویر خوب با آشکارسازهای مبتنی بر GaAs می‌تواند به دست آید. نسبت به مواد حجیم، در این آشکارسازها یکنواختی ماده بالاتر است و تغییرات موضعی خواص مواد کمتر می‌باشد. به علاوه، پیشرفت‌های حاصل شده در تکنیک‌های فرآوری flip-chip برای نیمه‌هادی‌های با Z بالا دلیلی برای بازده‌های پیکسلی بالا و بنابراین کیفیت تصویر خوب هستند.

### کلیدواژگان

آشکارساز، گالیم آرسناید، کاربردها، مزایا، معایب.



## مقدمه

V از جنس نیمه هادی در ترکیب آمیخته با فلز روی تشکیل می‌شود. بنابراین، ساختار بلوری آن به ترتیب شامل دو شبکه مکعبی face-centered نفوذ کرده هم در گالیم و هم در آرسنیک می باشد که به وسیله  $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$  در طول سلول واحد قطری offset (جبران -خنثی) می‌شود. GaAs یک نیمه هادی بی واسطه با  $\text{bandgap}=1.43 \text{ eV}$  (در 300 K) می باشد که استفاده اش را به عنوان یک وسیله اپتوالکترونیک<sup>۵</sup> یا آشکارساز تشعشعی از فونون های<sup>۶</sup> غیر افزوده<sup>۷</sup> no (additional) از شبکه بلوری تسهیل می کند و وجودش در تحریک الکترون از باند ظرفیت به باند هدایت ضروری است. دانسیته Ga برابر  $5.32 \text{ g/cm}^3$  و عدد اتمی آن ۳۱ و عدد اتمی آرسنیک ۳۳ می باشد. مقاومت نسبتاً بالای GaAs آن را به یک ماده برتر نسبت به سیلیس برای آشکار سازی ایکس تبدیل کرده است. خصوصیات مادی اصلی همراه با مهمترین خصوصیات ناقل (حامل) شارژ GaAs در جدول ۱ همراه با مقادیر Si و CdTe برای مقایسه داده شده است. تحرک الکترونی بالا منجر به کاربرد گسترده ساختارهای GaAs (hetero-) (ناهمگن) در وسیله های الکترونیکی با فرکانس بالا شده است (Bunger, 2006; Kretzer, 2007). اما، وقتی به عنوان آشکارساز تشعشعی استفاده می‌شود، به طور مقایسه-ای خواص حفره‌ای ضعیف‌ترش می‌تواند منجر به تجزیه سیگنال شود و استفاده از آشکارسازهای با پلاریته (قطبیت) منفرد<sup>۸</sup> اجباری است.

## روش های رشد کریستال های GaAs

تکنیک های اصلی رشد کریستال های GaAs عبارتند از روش LEC<sup>۹</sup> و روش VGF<sup>۱۰</sup> (هر دو بر

آشکارسازهای ذرات یا پرتو ابزاری هستند که با آنها ذرات پرانرژی را آشکار، ردیابی یا شناسایی می‌کنند، مانند موارد حاصل از واپاشی هسته ای، پرتوهای کیهانی یا واکنش های شتاب دهنده های ذرات بنیادی. یکی از این آشکارسازها گالیم آرسناید<sup>۱</sup> (GaAs) می باشد. این آشکار ساز از سال ۱۹۶۰، زمانی که سیگنال های تشعشع شده از کبالت <sup>۶۰</sup>Co را مشاهده کردند به عنوان یک آشکارساز معرفی شده است (Harding et al., 1960). در آن زمان که آشکارسازهای مبتنی بر مواد حجیم اولیه از تجمع بار ضعیف و اثرات دیگر مثل اسیلایسون<sup>۲</sup> رنج می‌بردند (Northrop et al., 1964)، دستگاه های مبتنی بر GaAs رشد یافته LPE ساخته شدند تا آشکارسازهای خوبی باشند (Eberhardt et al., 1971; Kobayashi et al., 1976). مشکلات در تولید لایه های ضخیم با دوپینگ<sup>۳</sup> (ناخالص سازی یا تغلیظ) به اندازه کافی کم نیاز به عمق های تهی سازی کافی (بیشتر از ۱۰۰ میکرومتر) داشت، در حالی که مانع توسعه بیشتر می‌شدند. سپس، علاقه جدیدی به آشکارسازهای برپایه هم مواد حجیم و هم مواد رشد یافته اپیتاکسیالی<sup>۴</sup> به عنوان آشکارسازی برای آزمایشات فیزیکی با انرژی بالا (Bertin et al., 1990) و به عنوان مواد آشکارسازی اشعه ایکس و گاما در دمای اتاق به وجود آمد (McGregor et al., 1992). لذا، هدف این مقاله بررسی خصوصیات، کاربردها، مزایا و معایب GaAs بود.

## خصوصیات مادی GaAs

GaAs، مثل بیشتر ترکیبات شیمیایی II-VI و III-

5. Optoelectronic
6. Phonons
7. no additional
8. Single polarity detectors
9. liquid encapsulated czochraski
10. Vertical Gradient Freeze

1. Gallium arsenide
2. Oscillation
3. Doping
4. Epitaxially-grown



جدول ۱- خواص مادی و حامل شارژ CdTe و GaAs.Si

CdTe	GaAs	Si	خواص مادی
Zinc blende	Zinc blende	Diamond	ساختار کریستالی
۴۸/۵۲	۳۱/۳۳	۱۴	عدد اتمی Z
۱/۵	۱/۴۳	۱/۱۲ (غیر)	Band gap @300 K [eV]
(مستقیم)	(مستقیم)	(مستقیم)	
۵/۸۵	۵/۳۲	۲/۳۳	دانسیته (g/cm <sup>3</sup> )
۱۱۰۰	۸۰۰۰ (undoped)	۱۴۰۰	تحرك الکترونی (cm <sup>2</sup> /Vs)
۱۰۰	۴۰۰ (undoped)	۴۸۰	تحرك حفره <sup>۷</sup> (cm <sup>2</sup> /Vs)
			انرژی مورد نیاز برای خلق جفت الکترون حفره (eV) (e-/h+)
۴/۴۳	۴/۲	۳/۶۲	

نموداری از روش LEC در شکل ۱ نشان داده شده است، قطر و کیفیت فلز، با پس کشیدن متفاوت و تغییر سرعت<sup>۸</sup>، می تواند کنترل شود. ویفر با قطر ۶" (۱۵۰mm)، توسط روش LEC (Rudolph and Jurisch, 1999) به طور نمونه با نرخ رشد چندین mm/h می تواند ایجاد شود. در صورتی که به طور نسبی افت درجه حرارت زیاد (تا تقریباً ۱۵۰ K/cm)، که برای جلوگیری از تجزیه فوری کریستال بعد از خروج از گدازه ضروری است، در رشد کریستال، منجر به تنش حرارت می شود. این منتج به یک دانسیته جابجایی بالا تا حد ۱۰۵/cm<sup>۳</sup> (Rudolph and Jurisch, 1999) و باعث جابجایی شاخص ساختار سلول بافت در GaAs رشد یافته در LEC می شود. این امر توسط رودولف (Rudolph, 2005) توصیف شده و در شکل ۵ دیده می شود. بنابراین اصلاح روش LEC مثل روش fully encapsulated Czochralski یا روش Vapor Pressure Controlled Czochralski (VCZ) برای کاهش افت درجه حرارت و بنابراین جابجایی دانسیته معرفی شده است.

اساس رشد از طریق ذوب کردن، به خوبی روش های اپیتاکسیال<sup>۱</sup> که در آنها رشد لایه های منفرد می تواند به دست آید و به طور مجزا کنترل شود. خصوصیات این سه روش عبارتند از:

### الف) روش Liquid Encapsulated Czochralski

در این روش که یکی از گسترده ترین روش های استفاده شده در صنعت است، مواد راه اندازی یعنی Ga, As و اگر لازم باشد، dopant های مناسب در یک crucible قرار می گیرند که سپس این crucible تا بالای دمای ذوب GaAs (۱۲۳۸ درجه سانتی گراد) بوسیله کویل (سیم پیچ) های RF گرم می شوند. گدازه<sup>۲</sup> توسط یک لایه مایع از تری اکسید بر (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) پوشیده می شود؛ بنابراین آن را مایع کپسوله شده<sup>۳</sup> می نامند که از بخار شدن آرسنیک فرار جلوگیری می کند. همراه با یک فشار کنترل شده گاز بی اثر اطراف Crucible به نگهداری گدازه نزدیک استوکیومتری<sup>۴</sup> کمک می کند. سپس کریستال دانه ای در لایه اکسیدبر در گدازه غوطه ور می شود تا یک سطح مشترک جامد-مایع در نوکش<sup>۵</sup> تشکیل شود. سپس کریستال دانه ای دوباره به آرامی تحت چرخش از گدازه جدا می شود. ایجاد جامد (سولیدیفیکاسیون<sup>۶</sup>) با افت درجه حرارت و قالب ریزی تک کریستال شروع می شود.

1. Epitaxial
2. Melt
3. Liquid encapsulated
4. Stoichiometry
5. Tip
6. Solidification

7. Hole mobility
8. varying withdrawal and rotation velocities



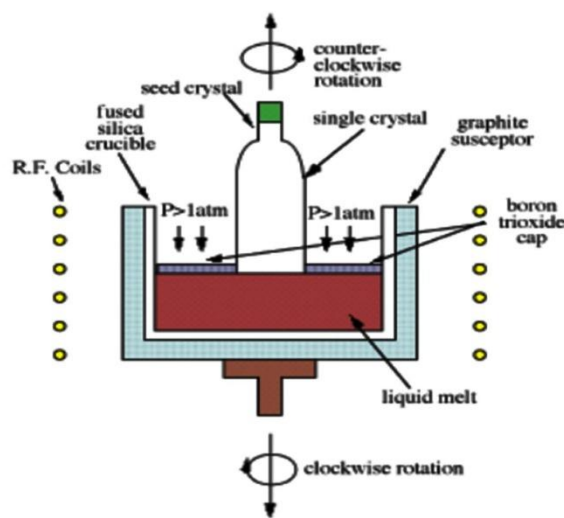
### ج) روش اپی تاکسیال

روش رشد توسط اپی تاکسیال که در زمره تکنیک برای نیمه هادی ترکیبی III-V است، مهم‌ترین روش کنترل دقیقی روی ایجاد پارامترهایی مثل ضخامت، نرخ رشد، ترکیب و شکل ظاهر ماده دارد. در روش MBE سلول‌های جداگانه حاوی مواد خام (جامد) Ga و As (و اگر لازم باشد dopants) در یک اتاقک خلاء ultra-high قرار داده می‌شوند. گرم کردن تا حدود ۵۸۰ درصد سانتی‌گراد باعث بخار این عناصر می‌شود که سپس روی ویفر زیر لایه (سوبسترای) مناسب (برای نمونه Si) مترکم می‌شوند و بنابراین یک ماده کریستال (بلوری) منفردی را تشکیل می‌دهند. با باز کردن یا بستن دریچه‌های (درپوش‌های) سلول‌های بخار، ضخامت و ترکیب مواد می‌تواند تا لایه‌های اتمی منفرد، کنترل شود. این امر اجازه می‌دهد ساختارهای ناهمگون<sup>۲</sup>، شبیه چاهک‌های کوانتومی یا نقاط کوانتومی<sup>۳</sup> را بسازیم. رشد کریستال (بلور) می‌تواند در شرایط *in situ* (در مکان) بوسیله پرتوهای پراش ایکس یا RHEED مانیتور شود. اما، میزان رشد پایین تقریباً تک لایه در ثانیه، این روش رشد را به فیلم‌های نازک محدود می‌کند. برای نمونه، برای وسایل اوپتوالکترونیک<sup>۴</sup> شبیه دیودها، سلول‌های لیزری یا خورشیدی، بنابراین برای رشد مواد اولیه حجیم نازک در مصارف (مخارج) منطقی مناسب نیست.

### عیوب و ناخالصی‌های GaAs

در هر کریستال (بلور) نیمه هادی واقعی انحرافات از ساختار اتمی بلوری کامل و درست می‌تواند یافت

2. heterostructures
3. quantum dots
4. optoelectronic
5. diodes



شکل ۱- طرح کلی روش رشد LEC (Barron, 2011)

### ب) روش Vertical Gradient Freeze

روش‌های دیگر که یک شیب درجه حرارت کوچکتری از روش LEC دارند روش Vertical Bridgman (VB) و روش اصلاح شده آن یعنی روش Vertical Gradient Freeze (VGF) هستند. بعد از ذوب مواد اولیه در یک crucible باز یا بسته، در هر دو روش رشد کریستال دوباره در یک کریستال دانه‌ای آغاز می‌شود و از این لحظه به بعد برای گردنه پایینی<sup>۱</sup> crucible عمودی مناسب می‌شود. شیب درجه حرارت یا به وسیله روش VB (حرکت دادن crucible downwards) یا توسط حرکت دادن عمودی میدان درجه حرارت تا وضعیت اختیاری کنونی crucible به وسیله روش VGF (multi-zone furnace) کنترل می‌شود. سرعت کریستالیزاسیون چند mm/h در این روش‌ها پایین تر از روش LEC است. همراه با شیب‌های درجه حرارتی کوچک و قابل کنترل (10 K/cm) منجر به کاهش استرس در کریستال می‌شود و بنابراین منجر به کاهش دانسیته جابجایی حداقل یک درجه‌ای و افزایش در جابجایی قطر سلول می‌شود (Rudolph and Jurisch, 1999; Bunger, 2006).

1. bottom neck



شود که می تواند پارامترهای فیزیکی و الکتریکی ماده را تحت تاثیر قرار دهد. آنها می توانند سطوح انرژی اضافی در bandgap تولید کنند که این سطوح به عنوان دهنده ها یا گیرنده ها عمل می کنند و منجر به حمل شارژ انرژی اضافی در ماده می شود یا به عنوان نردبان هایی برای حمل بار عمل می کنند که مقاومت و تحرک و طول عمر حامل بار را تحت تاثیر قرار می دهند. این نقایص می توانند تحت جنبه های ژئومتریال (چند بعدی) یا تحت جنبه منشا ان (نقایص ذاتی و بیرونی) طبقه بندی شود:

1. نقایص صفر بعدی ( نقایص نقطه ای) برای جاهای خالی (محل های شبکه تصرف نشده)، درون شبکه ای (اتم هایی که معمولا در سایت های خالی در بین سایت های شبکه قرار می گیرند) یا در اتصال با نیمه هادی ها و نقایص ضد سایت ( اتم های عناصر مختلف جاها را تغییر می دهند) تعریف شده اند.
2. نقایص یک بعدی (نقایص خطی) که جابجا شدگی نامیده می شوند. در جابجاشدگی های لبه ای یک صفحه شبکه ای به طور ناگهانی در داخل کریستال خاتمه می یابد، در حالی که در جابجا شدگی های پیچشی یک قسمت از بلور به وسیله یک یا بیشتر لایه های اتمی در طول یک خط جایگزین می شوند. جابجاشدگی ها زیاد می شوند تا در شبکه تغییر شکل دهند.
3. نقایص دو بعدی (نقایص سطحی یا دو وجهی) در سطوح رخ می دهند، برای نمونه بین فازهای مختلف یا دانه های کریستالی که به طور متفاوت جهت یابی شده است (تحت زاویه کوچک و بزرگ) یا می توانند از نقایص توده ای منتج شوند.
4. نقایص سه بعدی (نقایص حجمی) می توانند

انباشته هایی از نقایص یا ناخالصی های نقطه ای باشند (رسوبات، دخول ها و غیره).  
 5. نقایص ذاتی (درونی) نقایصی هستند که منشاء آن ها در خود ماده است و اتم های عناصر دیگر در آن نقشی ندارند.  
 6. نقایص خارجی (بیرونی) اصل شان از اتم های عناصر دیگری است که یا به طور انگلی (ناخواسته) وجود دارند یا عمدا به عنوان dopant اضافه می شوند.

در گالیم آرسناید چندین نقص ذاتی یافت شده است که از آنها antisite AsGa (یعنی اتم آرسنیک روی سایت گالیم) از مهمترین آنهاست و به طور ویژه ای در مواد حاصل از مواد مذاب غنی از آرسنیک وجود دارد. این نقص را همچنین نقص EL2 (شاید در ترکیب با یک As-vacancy) می نامند که یک دهنده مضاعف عمیق واقع شده در نزدیک وسط فاصله نواری (band gap) می باشد (Zychowitz, 2006).

نقایص بیرونی به فرم dopant می توانند در کنترل رسانایی و در کنترل مقاومت ویژه ماده در دامنه وسیعی استفاده شوند. برای نمونه، با افزودن Si، Sn و Te به عنوان دهنده برای ماده نوع n یا Be یا Zn به عنوان گیرنده هایی برای ماده نوع p (Kretzer, 2007)، ماده می تواند به صورت نیمه هادی (نیمه رسانا یا SC) درآید (SC با مقاومت ویژه پایین حدود  $10^{-3} \Omega cm$ ، برای نمونه برای ساخت وسایل اپتوالکترونیک. برای مواد نیمه عایق یا SI<sup>3</sup> (مقاومت ویژه SI یا نیمه هادی بیشتر از  $10^6 \Omega cm$  تا  $10^9 \Omega cm$ ) که برای نمونه، برای وسایل با فرکانس بالا یا آشکارسازهای تشعشعی کنترل مقدار کربن و به ویژه غلظت و تراکم EL2 در ماده تعیین کننده است تا مقاومت ویژه بالایی به دست آید (Ayzenshtat et al., 2002a; Jurisch et al., 2005; Bunger, 2006).



دامنه انرژی بالای ۵۰ keV یا حتی ۶۰ keV، که برای بیشتر دانشمندان یا کاربردهای پزشکی (مثل کریستالوگرافی، آزمایش غیر مخرب، ماموگرافی، تصویربرداری دندان یا تصویربرداری از نمونه های بیولوژیکی کوچکتر و غیره) قابل قبول است قدرت جذب GaAs با ضخامت ۵۰۰ میکرومتر به اندازه کافی بالاست (بزرگتر یا مساوی ۴۰٪ شدت جذب شده) تا به عنوان ماده سنسور استفاده شود. بنابراین، شکاف بین سیلیسیم را که قادر است به انرژی های فوتون کمتر از ۳۰ keV باند شود (با ضخامت منطقی سنسور) پر می کند و CdTe با جذب بالا (شکل ۳) که قدرت متوقف کردن بالایی، حتی برای اشعه های ایکس با انرژی های بیشتر از ۱۰۰ keV نشان می دهد، اما به طور اساسی در ضخامت بزرگتر مساوی یک میلی متر در دسترس است موجود می باشد و بنابراین برای به اشتراک گذاری شارژ مستعدتر هستند.

#### ب) مقاومت ویژه

دانسیته حامل شارژ ذاتی GaAs در ۳۰۰K برابر  $n_i = 2.25 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$  است (Blakemore, 1982)، که توسط جایگزینی مقادیر تحرک (جابجایی) از جدول ۱ در معادله ۱ منجر به مقاومت ویژه برابر  $\rho_i \approx 3 \times 10^8 \Omega \text{ cm}$  در ماده ذاتی می شود.

$$\rho = \frac{1}{q_0(n\mu_e + p\mu_h)} \quad (1)$$

اما به علت ناخالصی های کریستالی (بلوری) غلظت ها (تراکم های) حامل شارژ در کریستال های واقعی به طور معنی داری بالاتر هستند. بنابراین، چندین روش به ترتیب برای کاهش غلظت (تراکم) حامل شارژ یا افزایش مقاومت ویژه ارائه شده اند تا GaAs را به عنوان ماده سنسور برای آشکارسازهای تشعشعی مناسب سازند.

#### GaAs به عنوان آشکارساز پرتو ایکس

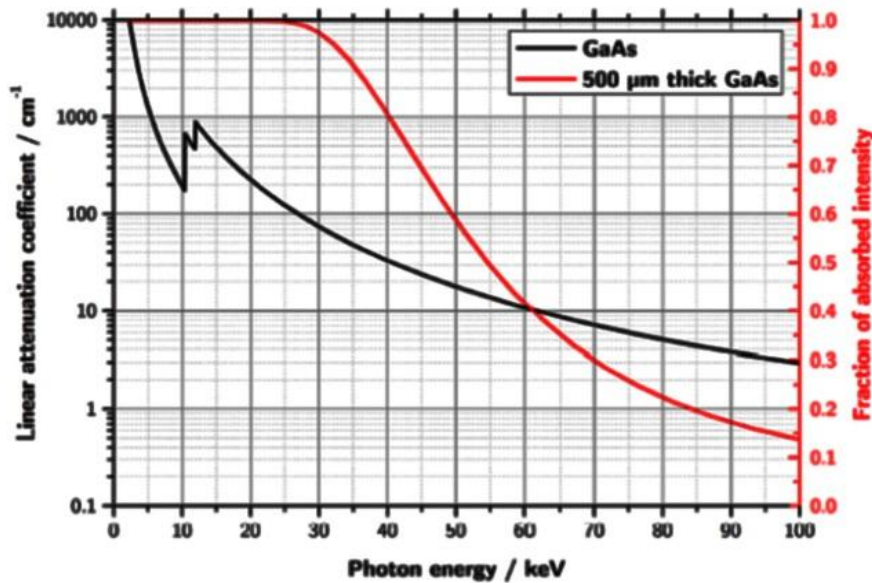
از جنبه های عمومی نتایج آزمایشات یافت شده در متون علمی از آغاز قرن ۲۱ شایستگی GaAs را به عنوان آشکارساز پرتو ایکس بیان کرده اند، ولی محدودیت هایش بر اساس نیاز در ادامه مورد بحث قرار گرفته است. به طور همزمان آشکارسازهای GaAs پرتو ایکس پیشرفته و مدرن به عنوان نقطه آغازی داده شده اند و مبنایی برای نتایج آزمایشات به دست آمده در این کار هستند که عبارتند از:

#### الف) جذب

ضریب تضعیف کلی<sup>۱</sup> برای GaAs در شکل ۲ برای انرژی های بالای ۱۰۰ keV همراه با کسرشدت جذب سنسور با ضخامت ۵۰۰ میکرومتر نشان داده شده است. جذب لبه های K<sup>۲</sup> به طور واضحی می تواند به ترتیب در ۱۰/۳۷ برای گالیم و ۱۱/۸۷ برای آرسنیک دیده شود. فوتون های فلورسنس که وقتی رخ می دهند که سطوح خالی از الکترون با الکترون های سطوح بالاتر پر شود در انرژی های کمی پایین تر متشعشع می شوند: برای گالیم انرژی ساطع شده K<sub>α</sub> برابر ۹/۲۵ keV است و ساطع شدن K<sub>β</sub> در ۵۰/۷ keV با بازده کل فلورسنس پوسته K برابر ۵۰/۷ درصد اتفاق می افتد. برای آرسنیک این انرژی ها به ترتیب در ۱۰/۵۴ keV و در ۱۱/۳۷ keV با بازده ۵۶/۲ درصد واقع می شوند. میانگین طول های مسیر آزاد این فوتون های فلورسنس در GaAs ده میکرون است (Tlustos, 2005) که آنها را قادر می سازد پیکسلی داشته باشند که در آن ایجاد می شوند و بنابراین باعث به اشتراک گذاشتن شارژ یا فرار آن می شوند و فلورسنس (اسپکتروسکوپی<sup>۴</sup>) در آشکار سازهای پیکسل کوچک به حداکثر می رسد. برای

1. total attenuation coefficient
2. K-edges
3. K-shell fluorescences
4. Spectroscopic





شکل ۲- ضریب تضعیف خطی GaAs (سیاه) و کسر شدت جذب سنسور با ضخامت ۵۰۰ میکرومتر (قرمز) در مقابل انرژی فوتون.

$p^+$  یا اگر یک لایه درونی (ذاتی) یا به طور ضعیفی لایه  $p$  (یا  $n$ ) در بین آنها وارد شود اتصالات  $p-i-n$  یا  $p-n$  یا  $p-\pi-v$  ایجاد می‌شوند. به علت وجود شیب های غلظت (تراکم)، حامل های شارژ حامل از دهنده ها و گیرنده ها در جهت مخالف انتشار پیدا می کنند (الکترون ها از سمت  $n$  به سمت  $p$  و حفره ها از سمت  $p$  به سمت  $n$ ) و سرانجام دوباره ترکیب می شوند. بنابراین، فقط دهنده یونیزه شده و اتم های پذیرنده در ناحیه مجاور با محل اتصال باقی می ماند. بر اساس معادله پواسن این شارژهای فضایی یک میدان الکتریکی را ایجاد می کنند که تبادل الکترون و حفره<sup>۸</sup> را تا رسیدن به تعادل خنثی و بی اثر می کنند. اجتماع این میدان الکتریکی بر روی ناحیه ای که در آن حامل های عاری از شارژ دیگر وجود ندارند (که به آن عرض تهی سازی<sup>۹</sup> می گویند) منجر به ولتاژ غیر قابل انتقال<sup>۱۰</sup> یا  $V_{bi}$  می شوند. اندازه عرض تهی سازی فقط بستگی به غلظت ها

روش اول استفاده از نیمه هادی ها (نیمه رساناهای) نشان دهنده شکاف باندی بزرگ<sup>۱</sup> است تا حامل های عاری از شارژ تهییج شده (تحریک شده) به وسیله گرما را به حداقل برسانند. برای نمونه، آشکارسازهای ژرمانیم باید با نیتروژن مایع سرد شوند تا غلظت بالای حامل های شارژ حاصل از شکاف باندی کوچک ماده را کاهش دهند ( $E_g = 0.67\text{ eV}$  در  $k$  در مقابل، مواد شبه  $CdTe$  ( $E_g = 1.5\text{ eV}$ ) یا  $GaAs$  ( $E_g = 1.43\text{ eV}$ ) می توانند در درجه حرارت اتاق استفاده شوند که طرح بندی<sup>۲</sup> آشکارساز و جایجایی وسیله را تسهیل می کنند.

روش دیگر برای کاهش تعداد حامل عاری از شارژ در یک ماده ایجاد ناحیه تهی سازی<sup>۳</sup> یا ناحیه شارژ فضایی<sup>۴</sup> در ماده به وسیله تغلیظ یا ناخالص سازی<sup>۵</sup> معکوس یک قسمت از ماده به نام نوع  $p^+$  و قسمت دیگر به نام نوع  $n$  می شود. بنابراین، اتصال  $n-$

1. large band gap
2. Layout
3. Depletion zone
4. Space charge region
5. Doping
6. p-type

7. p-n-junction
8. hole
9. Depletion width
10. Built-in voltage



روش سوم برای افزایش مقاومت ویژه مواد نیمه رسانا جبران ناخالصی<sup>۹</sup> نام دارد. غلظت (تراکم) سد (مانع) شارژی در ماده به وسیله ترکیب کردن (اساسا کمپلکس) ناخالص سازی و شمارش ناخالص سازی و به ترتیب با دهنده ها و گیرنده های سطحی و عمقی در طی رشد کریستال (بلور) حداقل می شود (Fiederle et al., 1998; Szeles, 2004; Kretzer, ) (2007).

همان طور که در بالا بیان شد برای GaAs کنترل غلظت (تراکم) دهنده عمقی EL2 تولید کریستال های نیمه عایق دشوار است ( $10^6 \Omega cm$ ) ( $\rho$ ). به طور مشابهی مقاومت ویژه می تواند به وسیله ناخالص سازی ۱۰ کربن مناسب (که به عنوان گیرنده سطحی عمل می کند) تحت کنترل همزمان غلظت اکسیژن و فشار گاز افزایش داده شود (Markov et al., 2001; Jurisch et al., 2005). سپس بر اساس مدل جبرانی مارتین (Martin et al., 1980) و همان طور که توسط بونگر (Bunger, 2006) بیان شده SI-GaAs تحت شرایط زیر به دست می آید:

$$N_{EL2} \phi N_C + (N_{SA} - N_{SD}) \phi 0 \quad (2)$$

در معادله ۲، N غلظت های عناصر اندیس مربوطه به نام های EL2، کربن (C)، گیرنده های سطحی (SA) و دهنده های سطحی تر از سطح EL2 یعنی SD می باشند. به علاوه، غلظت پایین ناخالصی های زمینه باقی مانده ضروری است. اما علیرغم مقاومت ویژه نسبتا بزرگی که می تواند به دست آورده شود، SI-GaAs جبران شده EL2 گزارش شده تا ناهمسانی و ناپایداری در توزیع میدان الکتریکی را گزارش دهد و منجر به نوسان های رایج شود (Ayzenshtat et al., ) (2002a). اغلب ترکیباتی از مقاومت ویژه پایین و یا متوسط ماده جبرانی با تشکیل تهی سازی اضافی به

(تراکم های) ناخالص سازی<sup>۱</sup> در ناحیه نوع n و نوع p و  $V_{bi}$  دارد. اگر یک میدان الکتریکی بیرونی<sup>۲</sup> استفاده شود این عرض تهی سازی بیشتر افزایش یا کاهش خواهد یافت که بستگی به قطبیت ولتاژ اریب<sup>۳</sup> دارد (که به ترتیب بایاس معکوس یا بایاس فوروارد نامیده می شوند). به طور مطلوب حجم سنسور کل باید تهی شود. اما، در حقیقت حامل های عاری از شارژ می توانند خارج از ناحیه تهی سازی باقی بمانند. این شارژ ها میدان الکتریکی خارجی را اسکرین می کنند و می توانند ناحیه مرده را در سنسور ترک کنند. ناحیه مرده ناحیه ای است که در آن میدان الکتریکی وجود دارد. پس این ناحیه برای تشخیص (آشکارسازی) تشعشع بی فایده است، چون شارژهای ایجاد شده در آن به سمت الکترودها حرکت نمی کنند و لذا به وسیله بازخوانی الکترونیکی مشاهده نمی شوند.

کاربرد اتصالات شاتکی<sup>۴</sup> فلزی برای مقاومت ویژه پایین تر یا غیر قابل پیش بینی مواد حجیم<sup>۵</sup> نیز به کاهش جریان کمک می کند. به علت تفاوت در عملکرد های الکترون در نیمه هادی ها (نیمه رسانا ها) و فلزات، تساوی شارژ بعد از عزل اتصال فلزی اتفاق می افتد تا سطوح Fermi<sup>۶</sup> در انرژی مشابهی در یک تراز قرار گیرند (Lutz, 1999). باندهای الکترون در نیمه رساناها<sup>۷</sup> منحرف می شوند و منتج به این می شوند که ناحیه تهی سازی به عنوان سد (مانع) شارژی یک طرفه<sup>۸</sup> عمل کند. مجددا با استفاده از ولتاژ بایاس خارجی ارتفاع سد (مانع) و عرض تهی سازی می توانند کاهش یا افزایش داده شوند.

1. Doping
2. External
3. Bias
4. Schottky contacts
5. Bulk
6. Fermi levels
7. Semiconductor
8. One way

9. Impurity compensation  
10. Doping





شود. به عنوان اولین قدم، Cr به وسیله بخار روی هر دو طرف ویفر GaAs<sup>۴</sup> نوع n با مقاومت و یژه پایین ته نشین (رسوب) می‌شود. برای اطمینان از انتشار اتم‌های Cr به عمق ماده حجیم، ویفر در درجه حرارت‌های بالا گرم می‌شود.

اگر نسبت غلظت‌ها به صورت زیر باشد:

$$N_{Cr} \phi N_D \phi N_{BG,i} \quad (۴)$$

که به غلظت‌های اندیس‌های Cr، الکترون‌های ناخالص سازی نوع n (D) و ناخالصی‌های زمینه‌ای به عنوان نقایص ذاتی (BG,i) به ترتیب اشاره دارد، الکترون‌های دهنده ابتدا ناخالصی‌ها را جبران می‌کنند. الکترون‌های اضافی دهنده‌های نوع n سطوح  $EL2^+$  عمقی را پر می‌کنند و سرانجام خودشان به وسیله وارد کردن گیرنده‌های Cr جبران می‌شوند که منتج به جبران تقریباً کامل، اما با مقاومت ویژه بالای ماده نوع p می‌شود. به عنوان گام نهایی بعد از فرآیند انتشار، ویفر به طور مکانیکی از دو طرف پولیش (سیقل) <sup>۶</sup> داده می‌شود تا لایه‌های باقی مانده غلظت بالای Cr حذف شود و منتج به غلظت Cr ثابت مطلوب در حجم کامل ویفر شود. به علت درجه حرارت بالا در طی گرم کردن و اتصال، سرعت‌های (میزان‌های) جبران بالا به دست می‌آیند و به عنوان اثر جانبی <sup>۷</sup> مرتب شدن دوباره نقایص ذاتی (بومی) <sup>۸</sup> در کریستال نیز به طور همزمان اتفاق می‌افتد (Ayzenshtat et al., 2002a).

به طور تکنولوژیکی این روش آسان تر عملی می‌شود چون ویفرهای GaAs نوع n که به طور تجاری در دسترس هستند می‌توانند استفاده شوند و نیازی به استفاده از فرآیندهای ناخالص سازی پیچیده

وسيله اتصالات شوتکی<sup>۱</sup> یافت می‌شوند (Zatko et al., 2004 and 2005; Zwerger et al., 2007) که بیشتر جریان‌های ناشی را کاهش می‌دهند، اما در برگشت منجر به ضخیم شدن لایه مقاومت ویژه محدود شده به علت فشار لایه‌های مرده می‌شوند.

مکانیسم جبرانی دیگر از نظر تاریخی اولین روشی است که به وسیله آن مقاومت ویژه بالا یا HR برای GaAs ( $P \phi 10^8 \Omega CM$ ) می‌تواند به طور تکرارپذیری تولید شود و توسط ناخالصی سازی کرومیوم<sup>۲</sup> (Cr) این روش اجرا می‌شود. اتم‌های Cr روی سایت گالیوم (آنتی سایت Cr<sub>Ga</sub>) می‌نشینند و به عنوان گیرنده‌های عمقی با سطح انرژی نزدیک به مرکز شکاف باند<sup>۳</sup> عمل می‌کنند ( $E_{Cr} \approx E_v + 0.78ev$ ) مشابه با معادله ۲ شرایط برای دستیابی به GaAs نیم عایق به صورت زیر است (Kretzer, 2007):

$$N_{Cr_{Ga}} \phi N_{SD} - N_{SA} > 0 \quad (۳)$$

در این جا نیز N به غلظت‌های مربوطه به کرومیوم روی سایت‌های گالیوم، دهنده‌های سطحی (SD) و گیرنده‌های سطحی (SA) اشاره دارد. این روش در ابتدا به طور موفقیت آمیزی به وسیله کرونین و هایستی (Cronin and Haisty, 1964) انجام شد. جبران کرومیوم در طی رشد کریستال به وسیله افزودن عنصر Cr به ماده خام در روش‌های رشدگدازه (melt) و نیز در طی رشد اپیتاکسیال می‌تواند انجام شود (Budnitsky et al., 2001; Ayzenshtat et al., 2002a).

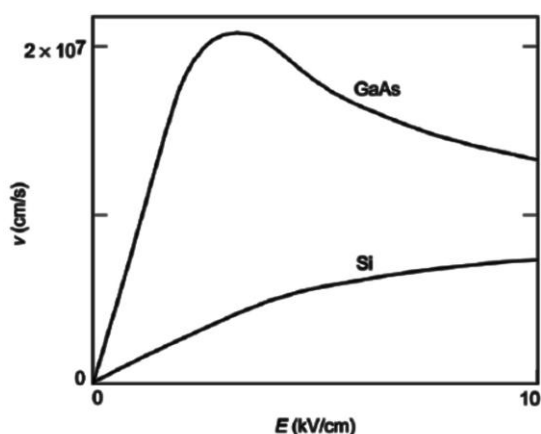
راه دیگری که در آن جبران Cr می‌تواند اجرا شود توسط ایزنشات و همکاران (Ayzenshtat et al., 2001 and 2002b) معرفی شد. در این روش جبران توسط انتشار درجه حرارت بالا پس از رشد عملی می‌شود.

4. wafer  
5. deposited  
6. polished  
7. side effect  
8. rearrangement of native defects

1. Schottky contacts  
2. chromium  
3. band gap



تحرك و پویایی الکترون ها در GaAs ذاتی (داخلی)<sup>۳</sup> تقریباً برای میدان الکتریکی تا ۳-۴kV/cm ثابت می ماند که منجر به رابطه خطی بین شتاب رانش<sup>۴</sup> و قدرت میدان<sup>۵</sup> می شود. در میدان های الکتریکی بالاتر این خطی بودن دیگر اعتبار ندارد و برقرار نیست. شتاب رانشی ابتدا اشباع می شود و سپس همراه با افزایش قدرت میدان کاهش می یابد.



شکل ۳- شتاب الکترونی در مقابل میدان الکتریکی برای Si و GaAs (Kayali et al., 1996).

GaAs حجمی<sup>۶</sup> (توده ای) در مقایسه با نیمه رساناهای دیگر یک تحرك الکترونی خیلی بالایی را نشان می دهد (جدول ۱ و شکل ۳) که منجر به سرعت جمع آوری بالا و بنابراین در زمان های جمع آوری کوتاه تر الکترون ها در سنسورهای آشکارساز می شود. اما، برای GaAs جبران شده با Cr و LEC رشد یافته در SI-GaAs با غلظت های کربن بالا، به طور قابل توجهی مقادیر پایین تری برای الکترون و تحريك پذیری های حفره یافت شده است (Markov et al., 2001; Tyazhev et al., 2003; Zarubin et al., 2006; Budnitskii et al., 2010). به علت جاذبه الکترونی بالا در یون های  $EL_2^+$  که به طور افزایشی در حضور

در طی رشد کریستال نیست. ماده GaAs با بالاترین مقاومت ویژه قابل دسترس ( $p = p_{\max} = 1.2q_0n_i\sqrt{\eta_e\eta_h} \geq 10^9 \Omega cm$ ) که گزارش شده است (Tolbanov, 2003) و به طور یکسان در ضخامت تا یک میلی متری کامل و یفر توزیع شده است (Ayzenshtat et al., 2004) می تواند با این روش تولید شود. به علاوه برتری HR-GaAs بر EL2 جبران شده، LEC رشد یافته در SI-GaAs در شرایط همگنی و یکسانی میدان الکتریکی و نوسان های جریان کاهش یافته توسط تیزاف و همکاران نشان داده شده است (Tyazhev et al., 2003). به علت مقاومت ویژه بالای ماده نیازی به تهی سازی (تخلیه) لایه ها یا اتصالات شوتکی نیست و بنابراین اتصالات اهمی می توانند برای ایجاد خصوصیت ولتاژ جریان خطی به کار گرفته شوند. علاوه بر این، به علت فقدان و غیاب لایه های مرده، حجم کامل سنسور به تشعشع حساس است و ماده را کاندیدای مناسب برای آشکارسازی های پرتو ایکس ضخیم تر می سازد.

مقاومت ویژه GaAs به دست آمده با این روش در مقایسه با CdTe یک برابر تقریباً کمتر است، اما در مقایسه با Si هنوز دو برابر بالاتر می باشد، بنابراین نزدیک کردن فاصله و شکاف بین این دو ماده سنسوری هنوز نیاز به کار دارد. با وجود این استفاده از ولتاژهای بایاس چند هزار ولتی در آشکارسازهای GaAs در مقایسه با جریان های با نشت (تراوش) پایین عملکرد<sup>۱</sup> کلکسیون شارژ<sup>۲</sup> به اندازه کافی را تضمین می کند.

### ج) تحرك و طول عمر

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است،

3. intrinsic  
4. drift velocity  
5. field strength  
6. Bulk GaAs

1. low leakage currents  
2. Charge collection efficiency



ترانسفر (انتقال) نیروی حرکتی آنی<sup>۵</sup> اضافه مورد نیاز متوقف می شود. بنابراین، الکترون ها می توانند در باند انتقال طولانی تر باقی بمانند که منجر به افزایش در طول عمر می شود.

اما، بیشتر سوالات مطرح که در این تئوری باقی مانده عبارتند از: تعیین طول عمر الکترون به وسیله اندازه گیری CCE تشعشعات گاما و بتا هستند (تحت فرض مقادیر خاص تحرک پذیری حامل شارژ) که منجر به مقادیر ۱-۳۰ ns می شوند، در حالی که نتایج حاصل از روش های ساکن بر اساس رسانایی نوری و اندازه گیری تحرک<sup>۱</sup> Hall به طور قابل توجهی نشان دهنده مقادیر بزرگتر تا  $10^{-7} s$  می باشد (Zarubin et al., 2006).

به طور اضافی طول عمرهای حفره به دست آمده از اندازه گیری های CCE مقادیر  $10^{-10} S$  تا  $10^{-9} S$  را نشان داد، اما روش های ساکن منجر به مقادیری از  $10^{-7} s$  تا  $10^{-6}$  (بسته به شدت تهییج) می شوند (Budnitskii et al., 2008). که ۳ تا ۴ برابر از روش آزمایشی تفاوت دارند. دلیل این امر به طور مطلق در حال حاضر مشخص نیست. اما، نه تنها تکنیک اندازه گیری به تنهایی بلکه روش جبران Cr به نظر می رسد بر طول عمر حامل انرژی مشاهده شده اثر می گذارند.

بادنیتسکی و همکاران (Budnitskii et al., 2010) گزارش کرده اند که طول عمر الکترون و حفره در GaAs جبران شده به وسیله ناخالص سازی Cr در طی رشد کریستال کمتر به صورت به دست آمده در ماده جبران شده به وسیله انتشار Cr پس از رشد یافت شده است. در اینجا نیز دلیل این امر روشن نیست، اما احتمالاً بستگی به یکنواختی (یا عدم یکنواختی) توزیع ناخالصی ها در ماده به خاطر فرآیند انتشار دارد.

میدان های الکتریکی بالا افزایش می یابند، EL2 جبران شده با SI-GaAs طول عمر الکترونی را کاهش می دهد (به کمتر مساوی 1 ns) و همراه با آن مقاومت ویژه و غلظت های  $EL2^+$  افزایش می یابد (Rogalla and Runge, 1999; Ayzenshtat et al., 2002a). در مقابل آن، طول عمرهای الکترونی بالاتر در محدوده ۱۰ ns می تواند در Cr جبران شده با GaAs یافت شود (Ayzenshtat et al., 2003; Zarubin et al., 2006) که مقادیر پایین ترش را برای تحرک الکترون موازنه می کند و منجر به تولید  $\mu T$  بالاتر در مقایسه با ماده جبران شده با EL2 می شود.

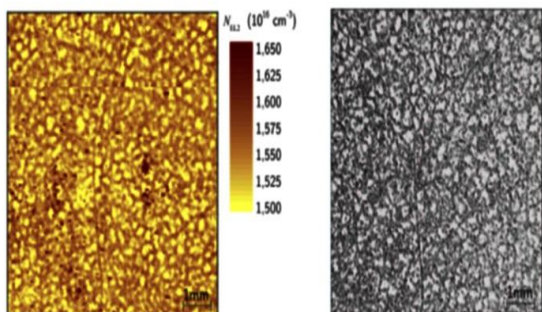
بر اساس تئوری نشان داده شده به وسیله ایزنشتات و همکاران (Ayzenshtat et al., 2001) و پیشنهاد شده توسط بونیتسکی و همکاران (Budnitskii et al., 2008 and 2011) که داده های آزمایشی را توضیح می دهد افزایش مشاهده شده در طول عمر از انحنا (خمیدگی<sup>۱</sup>) ساختار باندی در Cr انتشاری از GaAs جبران شده منشا می گیرد و به وسیله توزیع ناخالصی ناهمگون در ماده ایجاد می شود (Shklovskii and Efros, 1979). بر اساس این تئوری و همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است حداقل باند انتقال و هدایت و ماکزیمم باند ظرفیت در فضای دو جانبه<sup>۲</sup> جدا می شوند. حامل های شارژ اکنون باید بر سد انرژی<sup>۳</sup> اضافی یعنی  $\Delta E$  (که در شکل ۴ با ۱ و ۲ نشان داده شده است) غلبه کنند تا در  $E_i$  سطح عمقی از طریق نوترکیبی مستقیم ترجیح داده شده ترکیب جدیدی را به وجود آورند (با عدد ۳ نشان داده شده است).  $\Delta E$  اخیراً گزارش شده برابر  $0.2 eV$  (Tyazhev, 2013) و سطح عمقی فرض شده در مرکز Cr باشد (Budnitskii et al., 2010). انتقال<sup>۴</sup> (۴) به علت

1. Goffered curvature
2. Reciprocal space
3. Additional energy barrier
4. Transition

5. Momentum
6. Hall mobility measurements



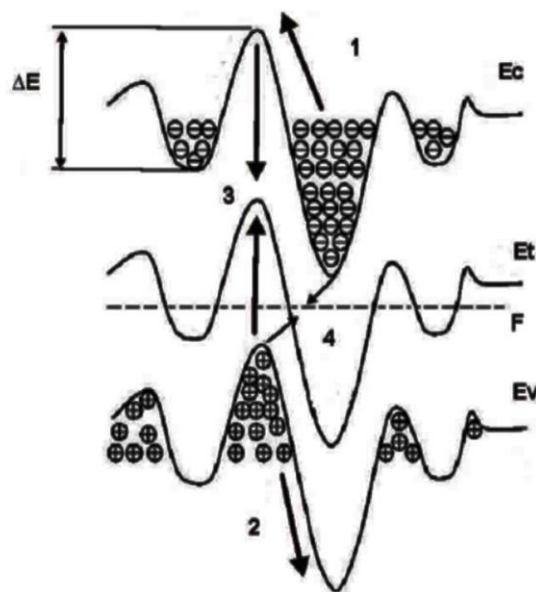
ناحیه مشابه (بعد از قلم زنی ویفر<sup>۳</sup>) را نشان می دهد که نمایانگر این هم بستگی است. این غیر یکنواختی ماده ممکن هست کیفیت تصویر آشکار سازهای GaAs را تحت تاثیر قرار دهد، اما همان طور که نشان داده شده می تواند با همان مقدار در آشکار سازهای بر مبنای SI-GaAs هم بستگی داشته باشد. چنین روش هایی در ماده جبران شده HRCr نیز وجود دارد، اما به علت مکانیسم جبران متفاوت مراکز غلظت EL2 (یونیزه شده) باید به طور بزرگی در طول جابجا شدگی کاهش یابند. اما، چگونگی همبستگی این روش ها با این ماده سنسور باید مورد مطالعه قرار گیرد. همان طور که در مورد جذب و مقاومت ویژه گفته شده، GaAs در بین SI و CdTe از نظر یکنواختی قرار می گیرد، به طوری که یکنواختی کریستال کمتر از SI تقریباً کامل و یکنواخت است، اما نقایص ساختاری بزرگتر، همانند آنچه که در CdTe یافت می شود، دیده نمی شوند.



شکل ۵- نقشه غلظت EL2 (سمت چپ) و حفره های سیاه جابجا شدگی (راست) LEC رشد یافته در ویفر SI-GaAs (Kretzer, 2007).

### و) پایداری عملکرد

برای یک آشکار سازی براساس SI-GaAs اپی تاکسیال، کاستامو و همکاران ناپایداری موقتی جریان تراوشی تحت ولتا ژهای اریب ثابت گزارش کردند که با ولتا ژهای افزایش قوی تر می شوند (Kostamo et al., 2008). نوولی و همکاران نوسانات



شکل ۶- مدل ساختار شکاف باند (قطعه) Cr جبران شده زیاد با GaAs. که در آن EC باند هدایت، EV باند ظرفیت، Et سطح نوترکیبی عمیق و F اندرژئی فرمی (Fermi) هستند (Tyazhev, 2013).

### د) یکنواختی ماده

در GaAs رشد یافته به روش های اپیتاکسیال، به خاطر سطح بالای کنترل بر پارامترهای رشد و بنابراین بر دانسیته های نقص، یکنواختی بالای ماده قابل انتظار می تواند باشد. اما، در GaAs رشد یافته در گداخته<sup>۱</sup> شبکه های جابجاشدگی تشکیل دهنده ساختارهای سلولی حاضر هستند (Rudolph, 2005). همان طور که قبلاً بیان شد (Markov et al., 2002; Kretzer, 2007)، تراکم EL2 در مرزهای این سلول های جابجاشده<sup>۲</sup> بالا هستند که منتج به تغییرات محلی (موضوعی) در مقاومت ویژه و طول عمرهای حامل شارژ در این نواحی به علت افزایش به دام اندازی الکترون می شوند. شکل ۵ نقشه هایی از غلظت های EL2 ویفر SI-GaAs رشد یافته LEC و تصویر میکروسکوپی نوری از شبکه جابجا شدگی در

1. Melt
2. Dislocation cells

3. After wafer etching



بنابراین، حذف اتصالات فلزی باعث مشکلاتی در ساخت آشکار ساز GaAs می‌شود. نگه دارنده‌های مشابه برای گام‌های فرآوری بیشتر شبیه لیتوگرافی و قلم زنی هستند که به طور معمول روی ساختارهای GaAs، برای نمونه روی وسیله‌های الکترونیکی اجرا می‌شوند. در ارتباط با هموار بودن سطح برای فرآیند Flip-chip، کاستامو و همکاران روی سطح خم شده ماده سنسور اپی‌تاکسیال مشابهی را گزارش کرده‌اند که نشان دهنده ناپایداری جاری با قسمت مرکز سنسور بالغ بر ۱۵ میکرومتر بالاتر از نواحی خارجی می‌باشد (Kostamo et al., 2008). این باعث سازگاری با فرآیند ضروری flip-chip استاندارد می‌شود و انجام آن موفقیت آمیز بوده است، اما شاید باعث استرس در ماده شود. تفاوت ضرایب انبساط گرمایی بین Si و GaAs می‌تواند منجر به استرس اضافی در سنسور شود. به این علت و مشکلات دیگر مربوط به Bump-bonding، تعداد قابل توجهی از پیکسل‌های غیر متصل یا غیر عملکردی<sup>۶</sup> در آشکارسازی‌های GaAs می‌تواند در مطالعات مختلف دیده شود (برای نمونه، Sellin et al., 2001; Zwerger et al., 2011; Tlustos et al., 2007) که البته برای کاربردهای تصویربرداری تعیین کننده هستند. بنابراین فرآیند جوش دادن و اتصال دیگر که در درجه حرارت‌های پایین اتفاق می‌افتد باید استفاده شود تا بازده پیکسل سنسور متصل به الکترونیک‌های بازخوانی<sup>۷</sup> افزایش یابد.

### انواع آشکارسازهای تصویربرداری GaAs در منابع چاپ شده

گالیوم آرسناید حداقل از دهه ۱۹۶۰ به عنوان ماده‌ای امید بخش برای آشکار سازهای پرتو ایکس و گاما در نظر گرفته می‌شده است و لذا به طور زیادی

جریان تراوشی (نشستی) ۱۷٪ در طول عمر (بیشتر از ۲۰۰ ساعت) را برای آشکار سازهای SI-GaAs ناخالص شده با C<sup>۱</sup> نشان دادند (Novelli et al., 2003)، که نویسندگان ادعا کردند که با تغییرات درجه حرارت آزمایشگاه در طی شبانه روز منطبق می‌باشد. به علاوه، بر اساس گزارشات دانشمندان و محققان ناپایداری‌های موقت بعضی اوقات تحت عنوان سوپ در حال جوشیدن<sup>۲</sup> یافت شده در SI-GaAs نامگذاری می‌شوند که احتمالاً به خاطر دامین‌های وابسته به زمان میدان‌های الکتریکی بالا (قوی) می‌باشند که در این ماده در ترکیب با میدان الکترونی افزایش یافته به دام اندازی یون‌های EL<sup>۲+</sup> هستند (Tyazhev et al., 2003). اما، برای آشکارسازهای GaAs جبران شده با Cr در مورد پایداری در طول عمر تحت تغییرات درجه حرارت ولتاژهای اریب بالا (قوی) و یا تشعشع با سرعت بالا<sup>۳</sup> گزارش وجود ندارد و باید مورد مطالعه قرار گیرد.

### ه) قابلیت پردازش

اتصالات شوکتی<sup>۴</sup> به وسیله بخار فلزی روی ساختارهای GaAs بارها، برای نمونه طلا (Bourgoin and Sun, 2002)، عیارهای شبه طلا AuZn (Dubecky et al., 2007) یا چند لایه‌ای Ti/Pt/Au (Zwerger et al., 2007) گزارش شده‌اند. اتصالات اهمی (شبه اهمی)<sup>۵</sup> بوسیله Ni/Je/Au چند لایه‌ای (Dubecky et al., 2007) یا عیارهای AuGeNi (Bohacek et al., 2008) روی SI-GaAs ساخته شده‌اند، در حالی که HR-GaAs جبران شده با Cr اتصالات اهمی را یا به طور اساسی با بخار V/Au (Tyazhev et al., 2003) یا Ni عملی می‌کنند.

1. C-doped SI-GaAs detectors
2. Boiling soup
3. High flux irradiation
4. Schottky contacts
5. (Quasi-)Ohmic contacts

6. Malfunctioning pixels
7. Readout electronics



پی آیند فرآیندهای قلم زنی<sup>۴</sup> انجام شده است. خواص الکتریکی خوبی، به جز برای جریان معکوس قوی (بالا) نشان داده شده است. اندازه گیری با یک تیوب پرتو ایکس رابطه خطی سیگنال خروجی آشکار ساز با ولتاژ آند تیوب و جریان تیوب (تا اشباع شدن) و زمان پاسخ کوتاه را ثابت کرده است. گزارش شده که طول های رانش حامل شارژ به ترتیب ضخامت لایه قرار می گیرند. نتیجه می گیریم که یک کاهش دز بزرگ در کاربردهای پزشکی پیشنهاد شده که اساسا مربوط به زمان پاسخ سریع است که اجازه زمان های دستیابی کوتاه تر را می دهد. یکی از تصاویر اشعه ایکس واقعی با آشکارسازهای مبتنی بر GaAs اپی تاکسیال توسط اچمدولین و همکاران ( Achmadullin et al., 2004) نشان داده شده است که از آنها در ساختارهای  $P^+ / n / n' / n^+$  رشد یافته به وسیله اپی تاکسی فاز بخار روی سوبستراهای  $n^+$  و اتصالات اهمی استفاده می شود. آشکارساز شامل دو خط ۵۱۲ پیکسلی (هر یک با ۸ میلی متر pitch) با یک خط شیفته داده شده (حرکت داده شده) نسبت به خط دیگر تا نصف pitch پیکسل<sup>۵</sup> (طرح بندی متناوب دو خطی<sup>۶</sup>) است.

حصول تصویر با این آشکارساز که با روش فتولتائیک<sup>۷</sup> کار می کند به وسیله روش اسکن شکاف<sup>۸</sup> تحت تشعشع تیوب اشعه ایکس اجرا می شود. رزولوشن فضایی  $lp/mm$  ۱/۲ و دامنه دینامیکی بیشتر از ۲۰۰۰ گزارش شده است. یک تصویر از دو ماهی ثبت شده با این روش در شکل ۶ الف نشان داده شده است. علیرغم کیفیت تصویر معقول، علامت های ۹ احتمال حاصل از فرآیند اسکن کردن در تصویر قابل رویت باقی می ماند، این تکنیک همچنین شاید

در تصویربرداری و وسایل اسپکتروسکوپی مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین، تعداد زیادی از مقالات که در آنها انواع گوناگونی از ساختارهای GaAs از روش های فرآوری شده و رشد متفاوت به عنوان آشکارسازهای تشعشع استفاده شده است، در دهه های اخیر گزارش شده اند. در این قسمت مروری انتخابی و خلاصه در مورد بعضی نتایج آمده در مقالات انجام می شود که نشان دهنده پتانسیل ها و محدودیتهای آشکار سازهای GaAs نوع state-of-art می باشد. فوکوس اصلی روی آشکارسازهای تصویربرداری حساس به مکان و نتایج جدیدتر چاپ شده از آغاز قرن ۲۱ می باشد.

### ۱. آشکارسازهای مبتنی بر GaAs اپی تاکسیال

اگر چه بیشتر مقالات در مورد کاربرد GaAs اپی تاکسیال به عنوان ماده سنسور برای آشکار سازهای تصویربرداری می باشند، به طور نادری تصاویر پرتو ایکس واقعی در این مقالات نشان داده شده اند، اما به طور اساسی خصوصیات الکتریکی وسایل یا کاربردهای اسپکتروسکوپی گفته شده است. البته بعد ها GaAs نیز اغلب به صورت کاندیدای مناسبی بیان شده و ثابت شده که رزولوشن های انرژی خوب و خواص آشکارسازی خوبی دارد (McGregor and Hermon, 1997). سان و همکاران (Sun et al., 2002) یک آشکارساز پیکسل شده<sup>۱</sup> بر اساس ساختارهای تپه<sup>۲</sup> ( $P^+ / i / n^+$ ) گزارش کرده اند. ماده سنسور با ضخامت  $120 \mu m$  به وسیله تکنیک واکنش شیمیایی در فاز بخار ایجاد شده و ناخالص سازی نوع n باقی مانده را در حد  $10^{14}$  نشان داده است. ساختارهای تپه پیکسل به وسیله فتولیتوگرافی<sup>۳</sup> عملی شده اند و با بخار اتصالات اهمی

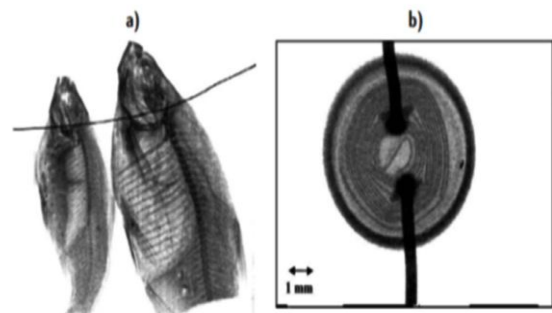
4. Etching processes
5. Pixel pitch
6. Bilinear staggered layout
7. Photovoltaic
8. Slit-scanning method
9. Stripes

1. Pixelated detector
2. Mesa structures
3. Photolithography



کرده بودند (Kostamo et al., 2008)، در حالی که تلاستوز و همکاران اندازه گیری‌های آشکارساز واقعی با فوتون های فلورسنس را نشان داده اند (Tlustos et al., 2008). GaAs با خلوص بالا که به وسیله روش اپیتاکسی فاز بخار هیدرید ایجاد شده منتج به غلظت‌های حامل شارژ آزاد پایین  $\approx 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  و دوپینگ نوع n زمینه‌ای ضعیف غیر عمدی می‌شود. نتیجه سنسور p/i/n ضخامت تقریباً ۱۱۰ میکرومتری بود. ساختار پیکسل تپه‌ای<sup>۶</sup> به وسیله etching یون انکساری<sup>۷</sup> برای کاهش جریان نشتی بین پیکسل‌ها ایجاد شده است. اما، طرف p پیکسل شده یک ناهمواری قوی<sup>۸</sup> با انحراف ارتفاع ماکزیمم ۱۵-۱۰ میکرومتری در مرکز سنسور دارد که مشکل bump-bonding را ایجاد می‌کند. علیرغم کرک شدن سنسور<sup>۹</sup> هنگام باز کردن بسته بندی، خصوصیات جریان-ولتاژ یک رفتار پایداری تا بیش از ۱۴۰ ولت را در جریان تاریک<sup>۱۰</sup>  $10^{-5} \text{ A}$  نشان داد. پاسخ انرژی آشکارساز نشان داده شد که خطی است و پیک های فلورسنس K برای Cd, Sn, Pd, In و Cu می‌تواند با رزولوشن انرژی ۱/۶ keV برای انرژی فوتون ۲۳ keV رفع شود. تحت تشعشع منبع  $^{90}\text{Sr}$ ، آشکارساز یک پاسخ یکنواخت (هموزن)<sup>۱۱</sup> فقط با ستون های غیر عملکردی را نشان می‌دهد. اما، تخمین (برآورد) عرض لایه تهی شده<sup>۱۲</sup> به وسیله مقایسه با آشکارساز Medipix2 سیلیکون کاملاً تهی شده یک لایه تهی نشده با ضخامت ۶۰ میکرومتر را آشکار کرده است، بنابراین بیشتر از نیمی از حجم سنسور غیر حساس به اشعه باقی می‌ماند.

منتج به زمان حصول بلند تر و بنابراین دزهای تشعشع بالاتر شود. ایرسیگلر و همکاران نتایج ناشی از آشکارساز منظم ۳۲۰ در ۲۴۰ پیکسلی بر اساس دو لایه با ضخامت  $50 \mu\text{m}$  رشد یافته به وسیله VPE روی سوبسترای نوع n با dope بالا را نشان داده اند (Irsigler et al., 2001). سنسور با ضخامت نهایی  $170 \mu\text{m}$  current integrating readout chip به بامپ-باند<sup>۱</sup> شده بود. گزارش شده که تغییرات حساسیت اشعه ایکس جریان تاریک موضعی در مقایسه با SI-GaAs حجمی<sup>۲</sup> کوچکتر است. در شکل ۶ ب یک تصویر اشعه ایکس اصلاح شده gain و offset از کاپاسیتور نمایش داده شده است که با یک تیوب اشعه ایکس در ۶۰ kVp در زمان تشعشع فقط ۳۱/۵ میلی ثانیه ثبت شده است. تصویر کیفیت خوبی را نشان می‌دهد و ساختار فویل های فلزی ۳ داخل کاپاسیتور به وضوح قابل تشخیص هستند.



شکل ۶- تصاویر اشعه ایکس ثبت شده با آشکارسازهای خطی (a) اساس GaAs اپی تاکسیال. (b) و پیکسلی (Irsigler et al., 2001) بر (Achmadullin et al., 2004)

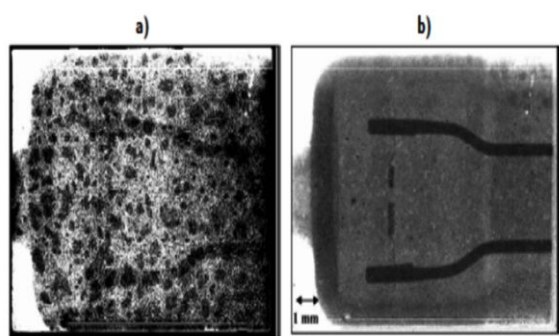
GaAs اپی تاکسیال با ساختارهای پیکسل تپه‌ای که به یک چیپ Medipix2 readout شمارنده فوتون بامپ-باند<sup>۴</sup> شده است، توسط کاستامو و همکاران و نیز تلاستوز و همکاران ارائه شده است. کاستامو و همکاران بیشتر روی ماده و ساخت آشکارساز تمرکز

1. Bump-bonded
2. Bulk
3. Metal foils
4. Bump-bonded

5. Unintentional slight background p-type doping
6. Mesa pixel structure
7. Refractive ion
8. Strong unevenness
9. Sensor cracked
10. Dark current
11. Homogeneous response
12. Depleted layer



out با جریان کامل، اما یک سنسور EC-grown با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر با ۳۲۰ در ۲۴۰ پیکسل را استفاده کردند که تپه<sup>۱</sup> ۳۸ میکرومتری دارد که قابل استفاده در کاربردهای تصویربرداری دندان پزشکی هستند. اتصالات شوتکی Ti/Pt/Au روی جنب جلویی ته نشین می شوند و اتصالات اهمی Ge/Au روی جنب پشتی ته نشین می شوند. آشکارساز در درجه حرارت اتاق عمل می کند. به علاوه، تغییرات موضعی در حساسیت آشکارساز که مربوط به نواحی تغییر دهنده خواص ماده می باشد (و بنابراین با شبکه‌های جابجا شدگی مجدد منطبق شده اند) به خوبی در چندین پیکسل ناقص مربوط به نتایج bump-bonded یافت شده اند. اما، استفاده از تکنیک های تصحیح تصویر و پیشرفت های همزمان در تکنولوژی تزویج یا اتصال داخلی<sup>۶</sup> به طور قابل توجهی منتج به کیفیت بالاتر تصویر برای انواع آشکارسازهای مشابه می شود. این امر در شکل ۷ نشان داده شده است (Irsigler et al., 2001). اما، بعضی ناهمگونی‌های (غیر یکنواختی های) باقی مانده در تصویر قابل رویت می‌ماند.



شکل ۷- تصویر خام (a) و تصحیح شده (b) لامپ برق ثبت شده با SI-GaAs پیکسل بندی شده bump-bonded به مدار کامل جریان (Irsigler et al., 2001).

یک سیستم تصویربرداری ماموگرافی مبتنی بر ارایه شطرنجی آشکارسازهای پیکسلی شمارنده فوتون

## ۲. آشکارسازهای مبتنی بر SI-GaAs (جبرانی)

شاید بیشترین تعداد تحقیقات روی آشکارسازهای تصویربرداری GaAs روی مجموعه های مبتنی بر SI-GaAs حجمی رشد یافته در گداخته<sup>۱</sup> به وسیله تعداد زیادی سنسور EL2 یا جبران شده با C باشد که بیشتر آنها در ترکیب با اتصالات شوتکی<sup>۲</sup> هستند. سلین و همکاران یک سنسور رشد یافته با VGF با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر با ۹۲ در ۱۰۰ پیکسل را معرفی کردند که یک تپه<sup>۳</sup> ۱۵۰ میکرومتری بامپ-باند شده<sup>۴</sup> به یک چیپ current-integrating CMOS read out دارد (Sellin et al., 2001).

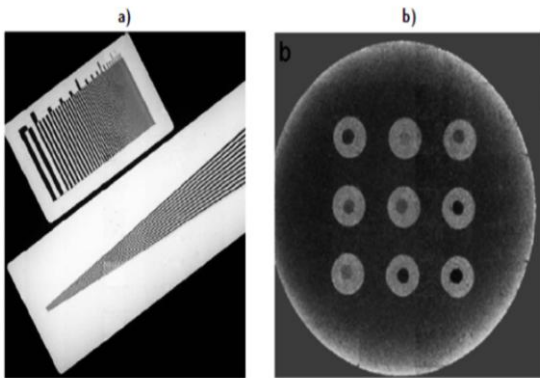
اتصالات شوتکی در جنب پیکسل و یک اتصال اهمی با کاشت یونی اضافی در جنب پشتی استفاده شده است. وسیله در درجه حرارت ۲۰- درجه سلسیوس برای کاهش بیشتر جریان پشتی عمل می‌کند. در نقشه جریان نشستی (یا نقشه جریان تاریک)، ثبت شده در غیاب تشعشع، ساختارهای سلولی و خطی متناظر با نواحی با حساسیت پایین‌تر قابل رویت بودند. آنها می توانند منسوب به شبکه های جابجا شدگی در ماده رشد یافته در گداخته باشند. همان طور که این امر در قسمت‌های بالا نشان داده شده تایید کننده نفوذ موضعی این نقایص روی خواص الکترونیکی در ماده می باشد. اما، این ساختارها به طور موفقیت آمیزی می‌توانند به وسیله تفریق تصاویر زمینه از تصاویر اشعه ایکس حذف شوند. علاوه بر ساختارهایی که از ماده سنسور می آیند، تعداد پیکسل های با عملکرد نادرست مربوط به مشکلات bump-bonded می تواند یافت شود. نتایج مشابهی توسط ایرسیگلر و همکاران به دست آمده است (Irsigler et al., 1999) که آنها یک چیپ Read

1. Melt-grown bulk SI-GaAs
2. Schottky contacts
3. Pitch
4. Bump-bonded

5. Pitch
6. Interconnection technology







شکل ۸- تصویر الگوهای ستون جیوه ۲ (a) و فانتوم ماموگرافی با پلیت‌های Al دارای ضخامت متفاوت (b) به دست آمده با نمونه آزمایش ۳ ماموگرافی SI GaAs Medipix1 (Annovazzi et al., 2007).

کیفیت تصویر و عملکرد کلی آشکارسازها بر اساس رزولوشن فضایی و عملکرد آشکارسازی خوب بود، اما بازده پیکسل به ترتیب ۹۰ درصد و ۹۸ درصد بود. همان طور که در شکل ۹ می‌تواند دیده شود به علت تغییر در طی bump-bonded این عملکرد نسبتاً ضعیف است. بازده پیکسل ۱۱۰ میکرومتر در مجموع بهتر است، اما به دلیل اندازه پیکسل بزرگتر، خصوصیات کوچک با این آشکارساز نادیده گرفته می‌شود. به علاوه لایه مرده با ضخامت ۵۰ میکرومتر در سنسورها به علت تهی سازی ناقص ماده در ولتاژ جرقه زنی حاضر بود.

### ۳. آشکارسازهای مبتنی بر HR-GaAs جبران شده با Cr

چندین منبع در مورد خصوصیات ماده و عملکرد اسپکتروسکوپی وسایل آشکارسازی تشعشع با استفاده از HR-GaAs جبران شده با Cr به عنوان ماده سنسور می‌تواند یافت، اما فقط تعداد کمی منبع در مورد آشکارسازهای تصویر برداری وجود دارد. به علاوه، باید اشاره کرد که کار روی این ماده مختصراً به وسیله

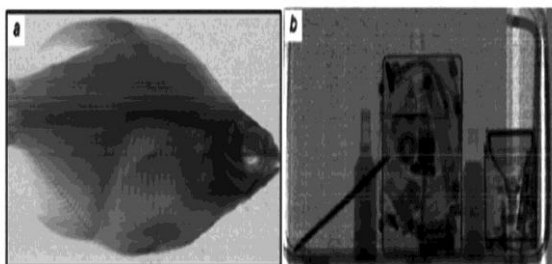
با سنسورهای SI-GaAs به خوبی نمونه آزمایش این سیستم معرفی و در چندین منبع تعریف شده است (Novelli et al., 2003; Amendolia et al., 2004; Bisogni et al., 2005; Annovazzi et al., 2007) ماده LEC با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر با اتصالات شوتکی و غلظت ناخالص سازی C با تقریباً  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  استفاده شده است که بهترین عملکرد اسپکتروسکوپی برای تمام مواد در مقایسه با این مطالعات به انضمام مقادیر CCE بالای ۹۰٪ برای فوتون های ۶۰ KEV گزارش شده است. گزارش شده که این سیستم بهتر از سیستم های ماموگرافی دیجیتال بر حسب SNR و رزولوشن تصویر اجرا می‌شود و GaAs به عنوان ماده سنسور در مقایسه با Si به خاطر جذب نسبتاً بالاتر اجرا می‌شود. تصویربرداری نواحی بزرگتر به وسیله اسکن جانبی ماتریس آشکارساز ۲ در ۹ و ثبت تصویر زنجیره‌ای اجرا می‌شود. این امر در شکل ۸ برای یک نمونه ماموگرافی و یک الگوی خطی سرب اجرا می‌شود. تنظیمات تیوب اشعه ایکس روی مقادیر استفاده شده در ماموگرافی یعنی ولتاژ شتاب یا شتاب دهنده ۲۷kV و جریان تیوب ۳۰mA گذاشته می‌شوند. کیفیت تصویر به خوبی بازده پیکسل است. اما، چندین ارتیفکت از فرآیند اسکن کردن حاصل از چیپ بازخوانی پرسر و صدا (نویزی) در تصاویر قابل رویت هستند.

زورگر و همکاران (Zwerger et al., 2007) اولین کسانی بودند که نتایج سنسور SI-GaAs با ضخامت ۳۰۰ میکرومتر با اتصالات شوتکی بامپ-باند شده<sup>۱</sup> Ti/Pt/Au به چیپ بازخوانی Medipixz با فرآیند flip-chip با درجه حرارت پایین را در FMF فرایبورگ (Fiederle et al., 2003) توسعه دادند. آشکارسازهای با تپه های پیکسل ۵۵ میکرومتری و ۱۱۰ میکرومتری تولید شده اند که ۱۱۰ میکرومتری فقط با یکی از پیکسل چیپ بازخوانی متصل شده بود.

1. Bump-bonded

2. Lead bar  
3. Prototype



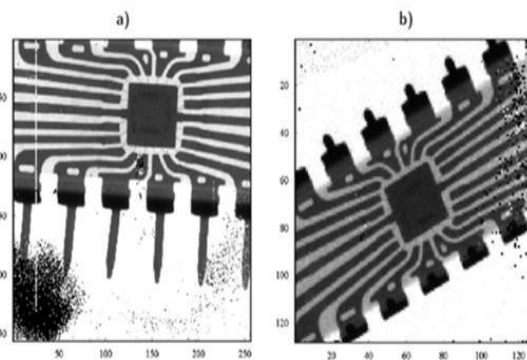


شکل ۱۰- تصاویر ثبت شده با سیستم آشکارساز اسکن کننده خطی با استفاده از HR-GaAs جبران شده با Cr به عنوان ماده سنسور (Ayzenshtat et al., 2008).

در خصوص آشکارسازهای پیکسلی، ایزنشتات و همکاران به وسیله تحریک سنسورهای CCE با ضخامت ۵۰۰ میکرومتر مقادیر پایین تری را برای قابلیت حرکت و طول عمر حامل شارژ در ماده جبران شده با Cr ( $\mu_e = 1500 \frac{cm^2}{Vs}$ ,  $\tau_e = 10ns$ ) را نشان دادند که چنین وسیله‌هایی قادر به اجرای آن هستند. اما به علت میانگین طول مسیر حفره کوچک فقط به طور صحیحی در مد جمع آوری الکترون<sup>۳</sup> کار می‌کنند (Ayzenshtat et al., 2003b). اما، علیرغم این حقیقت که این ماده احتمالاً برای کاربردهای تصویربرداری از آغاز تکنیک جبران Cr به وسیله انتشار مورد توجه قرار گرفته است (Ayzenshtat et al., 2002a)، آنها ادعا کردند که آشکارسازی پیکسلی با سنسورهای ضخیم قبلاً تولید شده اند (Ayzenshtat et al., 2002b) و چند سال تولید کشید تا اولین نتایج آشکارسازهای پیکسلی واقعی با استفاده از این ماده چاپ شده‌اند. بر اساس دانش نویسنده اولین کار با استفاده از آشکارساز پیکسلی با سنسور HR-GaAs ساخته شده از ویفرهای LEC نوع n به وسیله انتشار Cr توسط تلوسز و همکاران به چاپ رسید (Tlustos et al., 2011).

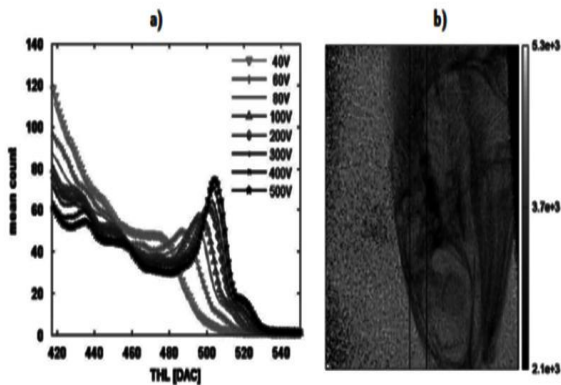
سنسور با ضخامت ۳۰۰ میکرومتر بامپ-باند شده

گروه ایزنشتات و همکاران (Ayzenshtat et al., 2003 and 2008) در دانشگاه ایالتی تومسک<sup>۱</sup> روسیه انجام شده است. با استفاده از آشکارسازهای نواری و تکنیک های اسکن کردن احتمالی، اولین تصاویر با سنسورهای HR-GaAs توسط ایزنشتات و همکاران نشان داده شده است (Ayzenshtat et al., 2003a) که با رزولوشن های فضایی IP/mm ۱/۴ برای نورهای تپه<sup>۲</sup> ۴۰۰ میکرومتری ماده حجیم جبران شده با انتشار و IP/mm ۲/۸ برای نورهای تپه ۲۰۰ میکرومتری ماده اپی-تاکسیال جبران شده در طی رشد به دست آمده است. اخیراً<sup>۳</sup> نتایج سیستم های اسکن کننده خطی پیشرفته (Ayzenshtat et al., 2008) کاربردی بودن ماده را برای تصویربرداری حیوانات کوچک یا پزشکی و بازدید چمدان‌ها و بارهای مسافران اثبات کرده‌اند (شکل ۱۰-۴). هر چند که چندین ارتیفکت تصویری ناشی از فرآیند اسکن کردن در این سیستم دیده می‌شوند.



شکل ۹- تصاویر چیپ TTL ثبت شده با آشکارسازهای Si-GaAs Medipix2 تولید شده با فرآیند flip-chip با درجه حرارت پایین در پیکسل های با سایز ۵۵ میکرومتر (a) و ۱۱۰ میکرومتر (Zwenger et al., 2007).





شکل ۱۱- (a) طیف های انرژی فلورنس برای چند ولتاژ بایاس و (b) تصویر اشعه ایکس سر ماهی اندازه گیری شده با آشکار ساز (Tlustos et al., 2011) Medipix2 GaAs:Cr

### نتیجه گیری

یک عملکرد اسپکتروسکوپی خوب، مقادیر CCE بالا و کیفیت تصویر خوب با آشکارسازهای مبتنی بر GaAs می تواند به دست آید. نسبت به مواد حجیم، در این آشکارسازها یکنواختی ماده بالاتر است و تغییرات موضعی خواص مواد کمتر می باشد. ساخت سنسورهایی با ضخامت چند صد میکرومتر، که برای عملکرد جذب بالا ضروری هستند مشکل است که این یک عیب می باشد. علیرغم این نتایج امیدبخش، استفاده از آشکارسازهای تصویربرداری پرتو ایکس GaAs اپی تاکسیال ادامه پیدا نکرده است یا حداقل انتشاراتی در این مورد موجود نیست. آشکارسازهای GaAs مبتنی بر نیمه هادی ها، گداخته رشد یافته و EL2 یا مواد جبران شده با C به طور گسترده ای پیشنهاد شده اند و چندین آشکارساز و سیستم تصویربرداری پزشکی با کیفیت تصویر خوب تولید شده اند. عدم یکنواختی مواد که برآمده از شبکه های جایجایی سلولی هستند وجود دارند و منجر به تغییر موضعی پارامترهای الکترونیکی و حساسیت به پرتو ایکس این آشکارسازها شده است. اما، این ساختارهای روی تصاویر در بعضی موارد قابل اصلاح هستند. به

به چیپ بازخوانی medipix2<sup>۱</sup> که به اتصالات اهمی مجهز شده بود از Au روی V روی هر دو جنبش ساخته شده است. مقاومت ویژه سنسور اندازه گیری شده برابر  $2 \times 10^7 \Omega$  بود که کمتر از مقاومت ویژه حجمی محاسبه شده یعنی  $10^9 \Omega cm$  است. که علت آن جریان های نشتی افزایش یافته از طریق لبه های ویفر می باشد. بازده پیکسل نسبتا پایین (تقریبا ۹۳ درصد) با بیشترین پیکسل های ناقص به علت نزدیک بودن به لبه های آشکار ساز بود. به علاوه ساختار سلولی به شکل تغییرات حساسیت تحت شدت روشنایی اشعه ایکس<sup>۲</sup> قابل رویت است (شکل ۱۱ ب) که به غیر یکنواختی سطح به وسیله شبکه های جابه جاشدگی ناشی از ماده آغاز کن LEC مربوط می شود. سنسور در  $500 V$  - بایاس بود که مربوط به میدان الکترونیکی  $16 V/cm$  است و بنابراین دور از ناحیه سرعت رانش الکترونی ماکزیمم است. اما، این ولتاژ بالا نیاز به دستیابی به بهترین CCE دارد (شکل ۱۱ الف) که نود درصد برای مجموعه تحت پژوهش محاسبه شده بود. حجم کامل سنسور و رزلوشن فضایی  $IP/mm$  ۸ در ۷۰ درصد MTF محاسبه شد. کالیبراسیون انرژی با استفاده از فوتون های فلورسنس چند فلز، یک خطی بودن عالی از مکان های پیک در مقابل انرژی بالغ بر  $30 keV$  را نشان داد. کیفیت تصویر با استفاده از این روش به علت بازده پیکسلی پایین و غیر یکنواختی بازده نسبتا ضعیف بود که در تصویر بعد از تصحیح flatfield<sup>۳</sup> قابل رویت بود.

1. Medipix2 readout chip
2. X-ray illumination
3. Flatfield correction



می‌کند و به دام اندازی حامل شارژ را به خاطر زمان رانش کوتاه‌تر در جریان‌های نشتی پایین کاهش می‌دهد. حرکت الکترون‌ها در GaAs جبران شده با HR Cr با فاکتور تقریباً "۲-۴ کاهش می‌یابد، اما طول عمر افزایش یافته الکترون منجر به تولید الکترون  $\mu T$  می‌شود که به خاطر حجم ماده حجیم می‌باشد. در نتیجه میانگین مسیره‌های آزاد الکترون‌ها تا چند میلی‌متر می‌باشد و بنابراین در دامنه بزرگتری نسبت به ضخامت معمول آشکارساز قرار می‌گیرند. یکنواختی ماده قابل مقایسه با GaAs رشدیافته در گذاخته است، از این رو به عنوان ماده اولیه انتخاب شده است. در نتیجه، انواع مشابهی از جابجاشدگی شبکه‌ها نیز در مواد جبران شده وجود دارند. پارامترهای دیگر شبیه پایداری عملکرد یا عدم یکنواختی مواد می‌تواند اصلاح شود که باید مورد مطالعه قرار گیرند. به خاطر این همه نکات امید بخش که هنوز هم به طور کامل خواصشان مطالعه نشده‌اند، این مواد موضوع این تحقیق قرار گرفتند. به علاوه، پیشرفت‌های حاصل شده در تکنیک‌های فرآوری flip-chip برای نیمه هادی‌های با Z بالا دلیلی برای بازده‌های پیکسلی بالا و بنابراین کیفیت تصویر خوب هستند.

علت مقاومت ویژه مواد نیمه هادی، استفاده از اتصالات شوتکی به طور گسترده‌ای برای ایجاد نواحی تهی سازی انجام شده است. این امر منجر به وجود لایه‌های مرده در سنسور محدود کننده ضخامت موثرشان و در نتیجه بازدهی جذبشان می‌شود. البته تعداد انتشارات استفاده کننده از SI-GaAs حجیم جبران شده در طی زمان کمتر و کمتر شده و توسعه آشکارساز و سیستم‌های تصویربرداری از شکل اولیه فراتر نرفته است. بسیاری از نتایج غیررضایت‌بخش با مواد جبران شده EL2 به خاطر مشکلات تکنولوژیکی به چاپ نرسیده‌اند و نتایج ویژه‌ای با پایداری عملکرد غیر قابل حل مانده‌اند. به علاوه، به علت عدم تولید مواد به وسیله تولید کنندگان به خاطر مشکلات اقتصادی، دسترسی به مواد شایسته برای تولید آشکارساز کمتر و کمتر شده است. امید بخش ترین مواد GaAs برای کاربردهای اسپکتروسکوپی و تصویربرداری مواد رشد یافته LEC با مقاومت ویژه بالا و جبران شده با انتشار Cr هستند. این مواد با ضخامت تا ۱ میلی‌متر هم در دسترس هستند که جذب بالا برای انرژی‌های پرتو ایکس را تا ۶۰ keV تضمین می‌کند. مقاومت ویژه بالا تا تقریباً  $10^9 \Omega cm$  اجازه استفاده از ولتاژهای اریب به اندازه کافی بالا را می‌دهد که این امر CCE بالا را تضمین



## منابع و مأخذ

1. Achmadullin R., Dvoryankin V., Dvoryankina G., Dikaev Y. M., Krikunov A., Kudryashov A., Panova T., Petrov A., Telegin A., X-ray imaging bilinear staggered GaAs detectors: Nucl. Instrum. Meth. 2004, 531: 89–91.
2. Amendolia S., Annovazzi A., Bigongiari A., Bisogni M., Catarsi F., Cesqui F., Cetronio A., Chianella M., Delogu P., Fantacci M., A prototype for a mammographic head and related developments: Nucl. Instrum. Meth. 2004, 518: 382–385.
3. Annovazzi A., Amendolia S., Bigongiari A., Bisogni M., Catarsi F., Cesqui F., Cetronio A., Colombo F., Delogu P., Fantacci M., A GaAs pixel detectors-based digital mammographic system: Performances and imaging tests results. Nucl. Instrum. Meth. 2007, 576: 154–159.
4. Ayzenshtat A., Budnitsky D., Koretskaya O., Okaevich L., Novikov V., Potapov A., Tolbanov O., Tyazhev A., Vorobiev A., GaAs as a material for particle detectors. Nucl. Instrum. Meth. 2002, 494: 120–127.
5. Ayzenshtat G., Babichev E., Baru S., Groshev V., Savinov G., Tolbanov O., Vorobiev A., GaAs detectors for medical imaging: Nucl. Instrum. Meth. 2003a, 509: 268–273.
6. Ayzenshtat G., Bakin N., Budnitsky D., Drugova E., Germogenov V., Khludkov S., Koretskaya O., Okaevich L., Porokhovnichenko L., Potapov A., GaAs structures for X-ray imaging detectors: Nucl. Instrum. Meth. 2001, 466: 25–32.
7. Ayzenshtat G., Bimatov M., Tolbanov O., Vorobiev A., Charge collection in X-ray pixel detectors based on SI-GaAs doped with Cr: Nucl. Instrum. Meth. 2003, 509: 52–55.
8. Ayzenshtat G., Bimatov M., Tolbanov O., Vorobiev A., Charge collection in X-ray pixel detectors based on SI-GaAs doped with Cr: Nucl. Instrum. Meth. 2003b, 509: 52–55.
9. Ayzenshtat G., Budnitskii D., Mokeev D. Y., Novikov V., Syresin E., Tolbanov O., Tyazhev A., Shelkov G., Gamma-ray detectors based on GaAs<Cr> for nanostructural investigations: Russ. Phys. J. 2008, 51: 1037–1052.
10. Ayzenshtat G., Budnitsky D., Koretskaya O., Novikov V., Mokeev D., Okaevich L., Tolbanov O., Tyazhev A., GaAs detector material made from 3-inch wafers: Nucl. Instrum. Meth. 2004, 531: 121–124.
11. Ayzenshtat G., Budnitsky D., Koretskaya O., Novikov V., Okaevich L., Potapov A., Tolbanov O., Tyazhev A., Vorobiev A., GaAs resistor structures for X-ray imaging detectors: Nucl. Instrum. Meth. 2002, 487: 96–101.
12. Ayzenshtat G., Budnitsky D., Koretskaya O., Okaevich L., Novikov V., Potapov A., Tolbanov O., Tyazhev A., Vorobiev A., GaAs as a material for particle detectors: Nucl. Instrum. Meth. 2002, 494: 120–127.
13. Barron A. R., Growth of gallium arsenide crystals, inside collection: Chemistry of Electronic Materials. last edited 09.08.2011. [Online]. Available: <http://cnx.org/content/m40280/latest/?collection=col10719/latest>
14. Bertin R., D'Auria S., del Papa C., Fiori F., Lisowski B., O'Shea V., Pelfer P.G., Smith K., Zichichi A., A Preliminary Study of GaAs Solid State Detectors for High-energy Physics: Nucl. Instrum. Meth. 1990: 211–218.
15. Bisogni M., Bulajic D., Delogu P., Fantacci M., Novelli M., Quattrocchi M., Rosso V., Stefanini A., Performances of different digital mammography imaging systems: Evaluation and comparison: Nucl. Instrum. Meth. 2005, 546: 14–18.



16. Blakemore J., Semiconducting and other major properties of gallium arsenide: *J. Appl. Phys.* 1982, 53: R123–R181.
17. Bohacek P., Zat'ko B., Dubecky F., Chromk Š., Huran J., Sekacova M., Role of new ohmic electrode metallization in detection performance of bulk semi-insulating GaAs radiation detectors: *Nucl. Instrum. Meth.* 2008, 591: 105–108.
18. Bourgojn J. Sun G., GaAs Schottky versus p/i/n diodes for pixellated X-ray detectors: *Nucl. Instrum. Meth.* 2002, 487: 47–49.
19. Budnitskii D., Koretskaya O., Ibanov P., Tyazhev V., Photoelectrical characteristics of as-grown highresistance GaAs single crystals: *Russ. Phys.* 2010, : 44–48.
20. Budnitskii D., Novikov V., Tolbanov O., Prudaev I., Chargecarrier lifetimes in high-resistance GaAs doped by chromium diffusion: *Russ. Phys.* 2008, 51: 531–535.
21. Budnitskii D., Novikov V., Tolbanov O., Yaskевич T., Evaluation of chromium concentration in high-resistive GaAs:Cr produced by diffusion: *Russ. Phys. J.* 2011, 54: 244–247.
22. Budnitsky D., Germogenov V., Guschin S., Larionov A., Porokhovnichenko L., Potapov A., Tolbanov O., Vorobiev A., Epitaxial structures based on compensated GaAs for gamma-and X-ray detectors: *Nucl. Instrum. Meth.* 2001, 466: 33–38.
23. Bunger T., Ein Beitrag zur Kohlenstoffkontrolle bei der VGFZuchtung von semi-isolierenden GaAs-Kristallen: Ph.D. dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg. 2006.
24. Bunger T., Ein Beitrag zur Kohlenstoffkontrolle bei der VGFZuchtung von semi-isolierenden GaAs-Kristallen: Ph.D. dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg. 2006.
25. Cronin G. Haisty. R., The preparation of semi-insulating gallium arsenide by chromium doping: *J Electrochem Soc.* 1964, 111: 874–877.
26. Dubecky F., Bohacek P., Sekacova M., Zat'ko B., Lalinsky T., Linhart V., Šagatova- Perd'ochova A., Mudron J., Pospšil S, Role of electrode metallization in performance of semi-insulating GaAs radiation detectors: *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 576, no. 1, pp. 87–89, 2007.
27. Eberhardt J. E. , Rayan R. D., Tavendale A. J. : *Nucleic Instruments Methods.* 1971.
28. Fiederle M., Braml H., Fauler A., Giersch J., Ludwig J., Anton G., Jakobs K., Development of flip-chip bonding technology for (Cd, Zn) Te: in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.* 2003, 1: 232–236.
29. Fiederle M., Eiche C., Salk M., Schwarz R., Benz K., Stadler W., Hofmann D., Meyer B., Modified compensation model of CdTe: *J. Appl. Phys.* 1998, 84, : 6689–6692.
30. Harding W. R. , Hilsum C. , Moncaster M. E. , Northrop D. C., Simpson O., Gallium Arsenide for  $\gamma$ -Ray Spectroscopy. *Nature.* 1960, 187: 405. doi:10.1038/187405a0.
31. Irsigler R., Andersson J., Alverbro J., Borglind J., Frojdh C., Helander P., Manolopoulos S., O'shea V., Smith K., Evaluation of 320×240 pixel LEC GaAs Schottky barrier X-Ray imaging arrays, hybridized to CMOS readout circuit based on charge integration: *Nucl. Instrum. Meth.* 1999, 434: 24–29.
32. Irsigler R., Andersson J., Alverbro J., Fakoor-Biniaz Z., Frojdh C., Helander P., Martijn H., Meikle D., Ostlund M., 320×240 GaAs pixel detectors with improved X-ray imaging quality: *Nucl. Instrum. Meth.* 2001, 460 : 67–71.
33. Jurisch M., Borner F., Bunger T., Eichler S., Flade T., Kretzer U., Kohler A., Stenzenberger J., Weinert B., LEC-and VGF-growth of SI GaAs single crystals—recent developments and current issues: *J. Cryst Growth.* 2005, 275: 283–291.
34. Kayali S., Ponchak G., Shaw R., JPL Publication 96-25: GaAs MMIC Reliability Assurance Guideline for Space Applications. JPL, California Institute of technology, Tech. Rep., 1996.



35. Kobayashi K., Lang R., Suppression of the relaxation oscillation in the modulated output of semiconductor lasers: IEEE J. Quantum Electron. 1976: 194-199.
36. Kobayashi T., Kuru I., Hojo A., Sugita T () IEEE Transactions on Nuclear Science NS-23. 1976, 97.
37. Kostamo P., Nenonen S., Vahanen S., Tlustos L., Frojdh C., Campbell M., Zhilyaev Y., Lipsanen H., GaAs Medipix2 hybrid pixel detector: Nucl. Instrum. Meth. 2008, 591: 174-177.
38. Kretzer U., Punktdefekte und elektrische Kompensation in Galliumarsenid-Einkristallen: Ph.D. dissertation, Technische Universität Chemnitz. 2007.
39. Lutz G., Semiconductor radiation detectors: device physics. Springer Verlag, 1999.
40. Markov A., Mezhenyi M., Polyakov A., Smirnov N., Govorkov A., Eremin V., Verbitskaya E., Gavrin V., Kozlova Y., Veretenkin Y. Semiinsulating LEC GaAs as a material for radiation detectors: materials science issues. Nucl. Instrum. Meth. 2001, 466: 14-24.
41. Markov A., Polyakov A., Smirnov N., Bolsheva Y., Govorkov A., Sharonov B., Comparison of deep levels spectra and electrical properties of GaAs crystals grown by vertical Bridgeman and by liquid encapsulated Czochralski methods. Solid-State Electron. 2002, 46: 269-277.
42. Martin G., Farges J., Jacob G., Hallais J., Poiblaud G., Compensation mechanisms in GaAs: J. Appl. Phys. 1980: 2840-2852.
43. McGregor D. Hermon H., Room-temperature compound semiconductor radiation detectors: Nucl. Instrum. Meth. 1997, 395: 101-124.
44. McGregor D. S., Knoll G.F., Eisen Y., Brake R., Development of Bulk GaAs Room Temperature Radiation Detectors: IEEE Trans. Nuclear Science. 1992, 39 : 1226-1236.
45. Northrop D. C., Thornton P.R., Trezise K.E. ,Electrical transients in high resistivity gallium arsenide: Solid-State Electronics. 1964, 7:17-24.
46. Novelli M., Amendolia S., Bisogni M., Boscardin M., Dalla Betta G., Delogu P., Fantacci M., Quattrocchi M., Rosso V., Stefanini A. , Semiconductor pixel detectors for digital mammography: Nucl. Instrum. Meth. 2003, 509: 283-289.
47. Novelli M., Amendolia S., Bisogni M., Boscardin M., Dalla Betta G., Delogu P., Fantacci M., Quattrocchi, M. Rosso V., Stefanini A. ,Semiconductor pixel detectors for digital mammography: Nucl. Instrum. Meth. 2003, 509: 283-289.
48. Rogalla M. Runge K., Formation of a quasi-neutral region in Schottky diodes based on semi-insulating GaAs and the influence of the compensation mechanism on the particle detector performance: Nucl. Instrum. Meth. 1999: 44-56.
49. Rudolph P. Jurisch M., Bulk growth of GaAs: An overview: J. Cryst Growth. 1999, 198: 325-335.
50. Rudolph P., Dislocation cell structures in melt-grown semiconductor compound crystals: Cryst Res. Technol. 2005, 40: 7-20.
51. Sellin P., Rossi G., Renzi M., Knights A., Eikenberry E., Tate M., Barna S., Wixted R., Gruner S., Performance of semi-insulating gallium arsenide X-ray pixel detectors with current-integrating readout: Nucl. Instrum. Meth. 2001, 460: 207-212.
52. Sellin P., Rossi G., Renzi M., Knights A., Eikenberry E., Tate M., Barna S., Wixted R., Gruner S., Performance of semi-insulating gallium arsenide X-ray pixel detectors with current-integrating readout: Nucl. Instrum. Meth. 2001, 460: 207-212.
53. Shklovskii B. I. Efros A. L., Electronic properties of doped semiconductors: Moscow Izdatel Nauka. 1979.
54. Sun G., Samic H., Haguët V., Pesant J., Montagne J., Lenoir M., Bourgoïn J., Performances of epitaxial GaAs p/i/n structures for X-ray imaging: Nucl. Instrum. Meth. 2002, 487: 102-106.



55. Szeles C., CdZnTe and CdTe materials for X-ray and gamma ray radiation detector applications: phys. Stat. sol (b). 2004 , 241: 783–790.
56. Tlustos L., Campbell M., Frojdh C., Kostamo P., Nenonen S., Characterisation of an epitaxial GaAs Medipix2 detector using fluorescence photons: Nucl. Instrum. Meth. 2008,591:42–45.
57. Tlustos L., Performance and limitations of high granularity single photon processing X-ray imaging detectors: Ph.D. dissertation, Technische Universität Wien. 2005.
58. Tlustos L., Shelkov G., Tolbanov O. P., Characterisation of a GaAs(Cr) Medipix2 hybrid pixel detector: Nucl. Instrum. Meth. 2011,633: S103–S107.
59. Tolbanov O., Quantum-sensitive ionizing radiation detectors compensated by gallium arsenide: Russ. Phys. J. 2003,46 :800–810.
60. Tyazhev A., Budnitsky D., Koretskay O., Novikov V., Okaevich L., Potapov A., Tolbanov O., Vorobiev A. GaAs radiation imaging detectors with an active layer thickness up to 1mm: Nucl. Instrum. Meth. 2003, 509:34–39.
61. Tyazhev A., Chromium Compensated GaAs Detector Material And Sensors: Presentation at the 15th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Paris, 2013.
62. Zarubin A., Mokeev D. Y., Okaevich L., Tyazhev A., Bimatov M., Lelekov M., Ponomarev I., Non-equilibrium charge carriers life times in semi-insulating GaAs compensated with chromium: in Proceedings of the 7th Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials. 2006:345–348.
63. Zatko B., Dubecky F., Bohacek P., Gombia E., Frigeri P., Mosca R., Franchi S., Huran J., Necas V., Sekacova M. ,On the spectrometric performance limit of radiation detectors based on semi-insulating GaAs: Nucl. Instrum. Meth. 2004, 531: 111–120.
64. Zatko B., Dubecky F., Šcepko P., Melov V., Herms M., Haupt L., Performance study of monolithic line radiation detector based on semi-insulating GaAs using X-ray source: Nucl. Instrum. Meth. 2005,551:78–82.
65. Zwerger A., Fauler A., Fiederle M., Jakobs K., Medipix2: Processing and measurements of GaAs pixel detectors: Nucl. Instrum. Meth. , 576: 23–26.
66. Zwerger A., Fauler A., Fiederle M., Jakobs, K. Medipix2: Processing and measurements of GaAs pixel detectors: Nucl. Instrum. Meth. 2007, 576: 23–26.
67. Zychowitz G., Ein Beitrag zum Nachweis tiefer Storstellen in halbisolierendem GaAs mittels PICTS: Ph.D. dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg. 2006.

