

شبیه سازی منبع بدون بایاس پالسی تراهرتز با استفاده از سد شاتکی نامتقارن

بویا ترکمان^۱، سارا درباری کوزه کنان^۲، محمد جواد محمد زمانی^۳

^۱فوق لیسانس برق الکترونیک، دانشگاه تربیت مدرس

^۲استادیار، دانشگاه تربیت مدرس

^۳استادیار، دانشگاه ملایر

چکیده

در این مقاله، یک منبع بدون بایاس تراهرتز شبیه سازی گردیده است. در این منبع با استفاده از دو اتصال شاتکی نامتقارن بر روی لایه ای از جنس بلور GaAs رشد داده شده در دمای پایین، میدان داخلی لازم را ایجاد کرده ایم. با این کار نیاز به بایاس خارجی حذف می گردد، که یکی از مزایای این ساختار است. سپس با تابش یک پالس زمانی گوسی با عرض باریک و طول موج ۸۰۰ nm بر روی نیمه هادی، باعث تولید حامل ها درون منطقه فعال می شویم. باریک بودن این پالس سبب تولید فرکانس های بالا در جریان تراهرتز تولیدی می شود که این جریان متغیر با زمان نیز موجب تولید و انتشار میدان تراهرتز به سمت کف افزاره می گردد. بکار بردن این ساختار برای تولید پالس به جای موج پیوسته، با توجه به کاهش شدید اثرات دمایی ناشی از تابش پیوسته نور لیزر بر افزاره، و نیز امکان افزایش توان لیزر ورودی نسبت به موج پیوسته، موجب دستیابی به توان های بیشتر گردیده و از طرف دیگر باریک بودن عرض پالس زمانی لیزر، موج تولید فرکانس های بالاتر و پهنای باند بزرگتر نسبت به موج پیوسته در موج تراهرتز خروجی می گردد. در این مقاله، شبیه سازی دو بعدی به روش عنصر متناهی انجام می شود.

کلیدواژه

امواج تراهرتز، نورسانا، منبع تراهرتز، LTG-GaAs

مقدمه

یا با انتقال به یک آنتن، سبب تشعشع موج تراهرتز می شود [۱]. به طور کلی می توان افزاره های نورسانا را از منظر نحوه ی تولید میدان الکتریکی مورد نیاز برای جداسازی و حرکت حامل ها، به دو دسته ی با بایاس خارجی و خود بایاس تقسیم کرد. احتیاج به بایاس در حدود یک کیلوولت در افزاره های با سطح نورگیر بزرگ [۲]، و یا احتمال اتصال کوتاه شدن در افزاره های شانه ای [۳]، از جمله مشکلات موجود در افزاره های بایاس دار می باشد. این مشکلات و نیز کاربردهای خاص افزاره های بدون بایاس، انگیزه و موتور محرک تحقیق و توسعه افزاره های بدون بایاس گردیده است. همانگونه که در مقالات پیشین نشان داده شده است [۴-۶]، منبع نورسانا بدون بایاس با اتصالات شاتکی با ارتفاع سد متفاوت، می توانند به خوبی حامل های نوری تولید شده را جداسازی کرده و موجب حرکت حامل ها با سرعت زیاد به سمت اتصالات فلزی شود. در عین حال از امکان اتصال کوتاه شدن افزاره نیز جلوگیری نماید. ما در این مقاله قصد داریم ساختار

طراحی و ساخت منابع کارآمد امواج تراهرتز، با توجه به خصوصیات جالب و کاربردهای متنوعی که این امواج دارند، در سال های اخیر بیشتر از هر زمانی مورد توجه قرار گرفته است. روش های متنوعی برای تولید این امواج وجود دارد، که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارا می باشند. در بین تمامی این روش ها، آنتن های نورسانا به دلیل تنظیم پذیری پهنای باند، سهولت ساخت و فعالیت در دمای اتاق، توجهات فراوانی را به خود جلب کرده اند [۱]. در این روش با استفاده از لیزر پالسی، یک پالس نوری با انرژی بیشتر از گاف انرژی نیمه هادی منطقه فعال، بر روی آن تابانده می شود. این نور پس از جذب در نیمه هادی، موجب تولید جفت الکترون-حفره در ناحیه ی تابیده شده می گردد. این جفت الکترون-حفره، تحت تاثیر میدان الکتریکی از یکدیگر جدا شده و حرکت آنها موجب تولید جریانی متناسب با پالس تابشی ورودی شده و این جریان متغیر با زمان، خود و

Energy gap ^۲

Photoconductive antenna ^۱

مقدار	متغیر
۱۴۰۰ nm	طول یک سلول (Z)
۱۰۰ nm	ضخامت اتصال فلزی (h)
۱۸۰ nm	فاصله بین دو اتصال (s)
۲۰۰ nm	عرض اتصال (K)
۱ μm	ضخامت افزاره (L)
۸۰۰ nm	طول موج لیزر (λ)
$\mu 400\text{w}/\mu\text{m}^2$	شدت نور لیزر (I_0)
۱۰۰ fs	طول پالس لیزر (τ_l)
۱۰۰ fs	طول عمر الکترون ها (τ_{n0})
۴۰۰ fs	طول عمر حفره ها (τ_{p0})
$400\text{ cm}^2/V.s$	موبیلیتی ^۵ الکترون (μ_n)
$100\text{ cm}^2/V.s$	موبیلیتی حفره (μ_p)
$1\ \mu\text{m}^{-1}$	ضریب جذب (α)
۱۳.۸	گذردهی الکتریکی (ϵ_r)
$\Omega 377$	امپدانس خلا (Z)
۱,۱۱ eV	ارتفاع سد شاتکی M_1
۰,۸ eV	ارتفاع سد شاتکی M_2

جدول ۱. متغیر های شبیه سازی افزاره

حامل هایی که در اثر تابش نور لیزر و جذب آن داخل افزاره تولید شده اند، اکنون تحت تاثیر این میدان الکترواستاتیک حرکت کرده و باعث تولید جریان های تراهرتز در داخل افزاره می شوند. این جریان های متغیر با زمان تولید شده در داخل افزاره در حرکت خود به سمت اتصالات فلزی، موجب تولید موج تراهرتز شده، که این موج با توجه به جهت حرکت جریان غالب، به سمت کف افزاره می باشد و از آنجا خارج می گردد.

معادله های حاکم

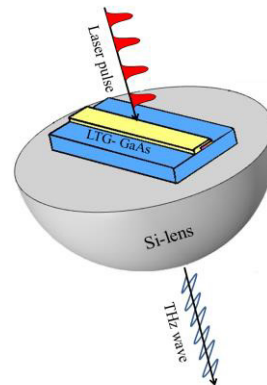
به منظور حل دقیق و کامل افزاره، با توجه به این که عرض پالس ورودی در حدود چند ده فمتو ثانیه می باشد، لازم است تا از مدل نیمه کلاسیک مونت کارلو استفاده شود تا جزئیات پراکندگی حامل ها پس از جذب نوری لحاظ گردد [۷]. هر چند جواب های به دست آمده از روش مونت کارلو اغلب با نتایج تجربی هم خوانی خوبی دارد، اما با توجه به روش آماری که این مدل حل دارد نیاز به کار محاسباتی سنگین و زمان بر می باشد، که برای کاربردهای حوزه ی مهندسی مناسب نیست [۸]. از طرف دیگر روش drift-

پیشنهادی در مرجع [۴] که برای تولید موج پیوسته تراهرتز^۳ استفاده گردیده است را برای تولید پالس تراهرتز استفاده نماییم. به کار بردن این ساختار برای تولید پالس به جای موج پیوسته، با توجه به کاهش شدید اثرات دمایی ناشی از تابش پیوسته نور لیزر بر افزاره، و نیز امکان افزایش توان لیزر ورودی نسبت به موج پیوسته، موجب دستیابی به توان های بیشتر گردیده و از طرف دیگر باریک بودن عرض پالس زمانی لیزر، موج تولید فرکانس های بالاتر و پهنای باند بزرگتر نسبت به موج پیوسته در موج تراهرتز خروجی می گردد.

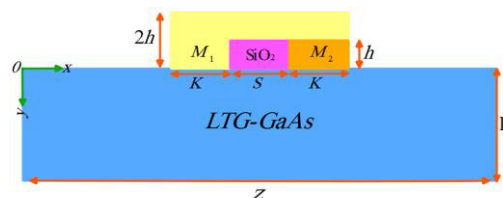
ساختار افزاره

در شکل ۱ ساختار یک سلول از افزاره مشاهده می شود. روی این افزاره یک پالس نوری نزدیک به لبه ی جذب GaAs به طول موج ۸۰۰ nm می تابانیم. با توجه به بزرگتر بودن انرژی این موج از گاف انرژی بستر، این موج در بستر جذب شده و موجب تولید جفت الکترون - حفره در درون بستر می گردد.

در این افزاره به منظور ایجاد میدان داخلی به جای بایاس خارجی برای حرکت دادن حامل ها، از اتصال شاتکی دو فلز متفاوت روی بستر استفاده شده است. با توجه به این که متفاوت بودن دو فلز موجب تفاوت ارتفاع سد شاتکی آنها بر روی بستر می گردد، نوار هدایت در داخل افزاره متناسب با این تفاوت، تغییر کرده و موجب تولید یک میدان داخلی الکترو استاتیک در داخل افزاره می شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱. ساختار کلی یک سلول از افزاره (الف) نمای سه بعدی (ب) نمای دو بعدی

^۵ Mobility
^۶ Semi classical Monte Carlo

$$q \frac{\partial n_{n,p}(r,t)}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{j}_{n,p}(r,t) + q(-R(r,t) + G(r,t)) \quad (5)$$

$$\vec{j}_{n,p}(r,t) = -q\mu_{n,p}N_{n,p}(r,t)\nabla\phi(r,t) + qD_{n,p}\nabla N_{n,p}(r,t) \quad (6)$$

که در آن $\phi(r,t)$ پتانسیل الکترواستاتیکی و $N_{n,p}(r,t)$ چگالی الکترون و حفره‌ها می‌باشد. همچنین $\vec{j}_{n,p}(r,t)$ چگالی جریان الکترون و حفره و ε ضریب گذردهی الکتریکی و $c_t(r,t)$ تراکم ناخالصی‌ها و $G(r,t)$ نرخ تولید و $R(r,t)$ نرخ بازترکیب حامل‌ها می‌باشد. همچنین $D_{n,p}$ ضریب انتشار و $\mu_{n,p}$ موبیلیتی حامل‌ها می‌باشد. در حل عددی این افزاره بازترکیب‌های SRH^9 و اوزه‌نر نظر گرفته شده‌اند و در طول مرزهای خارجی افزاره شرایط مرزی بازتاب‌کننده استفاده گردیده است تا جریان فقط از طریق دو اتصال فلزی داخل یا خارج شوند، تحت این شرایط مرزی در طول این مرزها در نبود بار سطحی مولفه‌های عمود میدان الکتریکی صفر می‌گردند [17]. مقادیر به دست آمده از حل معادلات فوق می‌تواند برای محاسبه جریان تراهرتز و توان افزاره استفاده گردد [20]. پارامترهای فیزیکی و ساختاری مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول 1 لیست شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی

در این افزاره از دو اتصال فلزی متفاوت به منظور ایجاد میدان داخلی و همچنین مسیر انتقال جریان استفاده شده است. پیش از هرگونه بررسی دیگری، بررسی الکترواستاتیک افزاره می‌تواند نحوه‌ی عملکرد افزاره را روشن نماید. بدین منظور در شکل 2-الف و ب نوار هدایت به ترتیب برای حالتی که هر دو فلز یکسان هستند و سد شاتکی هر دو $\phi = 1.11 \text{ eV}$ می‌باشد و حالتی که فلز M_2 متفاوت از فلز M_1 است و سد شاتکی معادل $\phi = 0.8 \text{ eV}$ دارد، در فاصله $y=1 \text{ nm}$ رسم گردیده است. همانطور که در شکل 2-الف با توجه به جهت حامل‌های الکترون و حفره دیده می‌شود، زمانی که هر دو فلز یکسان هستند جهت حرکت این حامل‌ها به شکلی است که جریان در دو طرف فلزات در جهت مخالف یکدیگر ایجاد می‌شود و این جریان‌ها همدیگر را خنثی می‌نمایند. در نتیجه چنین ساختاری کاربردی برای تولید جریانی موثر ندارد. اما در شکل 2-ب که نوار هدایت برای دو فلز متفاوت به نمایش درآمده است، جریان‌ها در دو طرف فلزات و بین آنها به شکلی است که یکدیگر را تقویت کرده و با هم جمع می‌شوند. در شکل 2-ج مولفه‌های میدان الکتریکی متناسب با بخش ب همین شکل رسم شده است، که بیشینه آنها در لبه‌های اتصالات فلزی اتفاق می‌افتد. از روی این شکل می‌توان دریافت که چنانچه بیشترین تولید حامل‌ها در نزدیکی

diffusion به کار رفته در این شبیه‌سازی، نسبت به روش مونت کارلو زمان محاسباتی بسیار کمتری نیاز داشته و همچنین نتایج به دست آمده نیز از دقت قابل قبولی بهره‌مند هستند [13-18]. معادله‌های حاکم بر تولید و انتشار امواج تراهرتز، معادله‌های ماکسول و معادله‌های پیوستگی و پواسون می‌باشند [14]. برای حل عددی این معادله‌ها در این پژوهش از روش عنصر متناهی^۷ دو بعدی استفاده شده است. با تابیدن نور لیزر بر روی افزاره، جفت الکترون-حفره در داخل نیمه‌هادی تولید می‌شود. برای یک لیزر گوسی با طول موج nm 800 و پهنای زمانی fs 30 ، توزیع شدت در داخل افزاره با حل معادلات ماکسول و سپس بردار پوینتینگ^۸ (S_{av}) از رابطه شماره 1 به دست می‌آید [15]:

$$S_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(E \times H^*) \quad (1)$$

که E و H به ترتیب فازورهای میدان الکتریکی و مغناطیسی نوری می‌باشند. توزیع چگالی توان W از رابطه 2 محاسبه می‌شود [4]:

$$W = -\nabla \cdot S_{av} \quad (2)$$

و در نهایت متوسط نرخ تولید حامل‌ها (G_{av}) از رابطه 3 محاسبه می‌گردد [15]:

$$G_{av} = \eta \frac{W}{h\nu} \quad (3)$$

که در آن h ثابت پلانک ν طول موج نور و η بازدهی کوانتومی می‌باشد. نرخ تولید حامل‌های محاسبه شده به طور کلی یک عدد ثابت می‌باشد، که فاقد هیچ گونه بخش زمانی است، لذا به منظور افزودن بخش زمانی به آن برای استفاده در معادلات drift-diffusion که در حوزه‌ی زمان حل می‌شوند، لازم است مقدار محاسبه شده را در تابع گوسی ضرب کرده و نتیجه حاصله را برای حل عددی در معادلات نیمه‌هادی به کار ببریم. پس از محاسبه نرخ حامل‌های تولید شده این نرخ را در معادلات انتقال حامل‌ها به کار می‌بریم و با استفاده از آن جریان تراهرتز و میدان‌های الکتریکی در حوالی منطقه فعال را محاسبه می‌نماییم. مدل‌های متفاوتی برای محاسبه انتقال حامل‌ها در نیمه‌هادی وجود دارد. در این مقاله از مدل drift-diffusion برای محاسبه جریان تراهرتز نوری استفاده شده است. این مدل پدیده‌های فیزیکی متفاوتی از جمله: جریان و حامل‌های تولید شده ناشی از نور لیزر و همچنین تصویر شدن حامل‌ها را نمایش می‌دهد [16]. معادلات drift-diffusion در حوزه‌ی زمان شامل معادلات پواسون و پیوستگی برای الکترون و حفره به شکل زیر است [17]:

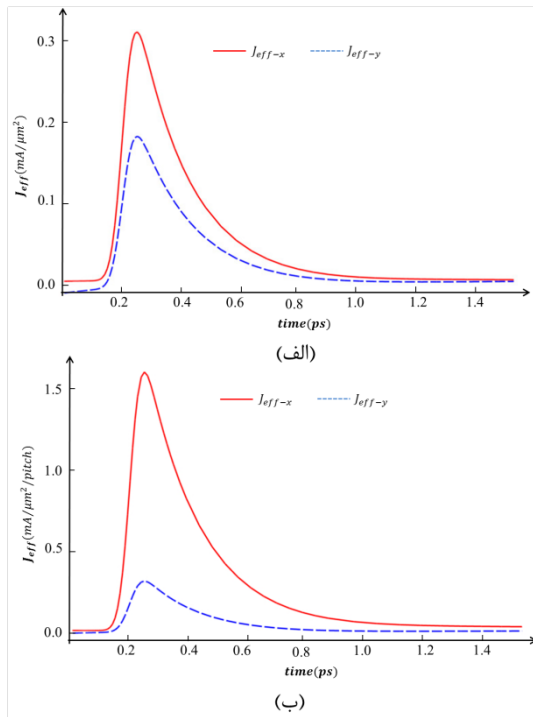
$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi(r,t) = q(n(r,t) - p(r,t) - c_t(r,t)) \quad (4)$$

⁹ Shockley Read Hall
^{۱۰} Auger

^۷ Finite element method
^۸ Poynting vector

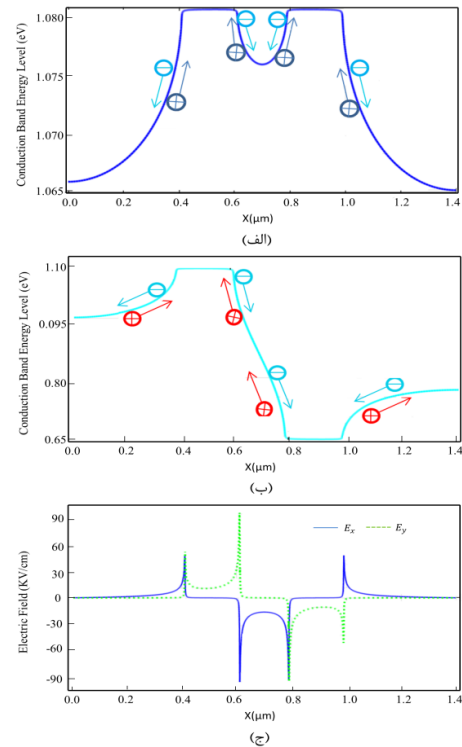
در شکل ۳-الف و ب نرخ تولید حامل ها در یک واحد از افزاره و آرایه ای آن محاسبه و رسم گردیده است. تفاوت نرخ تولید حامل -ها در این دو شکل با یکدیگر به دلیل تغییر شرایط مرزی در آرایه افزاره ها، از شرایط مرزی جاذب به شرایط مرزی متناوب است. همانطور که در شکل ۳ می بینیم، نرخ تولید حامل ها در سطح نیمه هادی و در لبه فلزات از سایر مناطق بیشتر است. از طرف دیگر همانطور که پیش تر ذکر کردیم، بیشترین میدان الکتریکی در لبه فلزات قرار دارد. در نتیجه تولید حامل ها دقیقاً در منطقه ای که بیشترین میدان الکتریکی نیز وجود دارد باعث افزایش جریان و بهبود توان تشعشی می گردد. اکنون پس از محاسبه نرخ تولید حامل ها به محاسبه جریان داخل افزاره پردازیم. با توجه به این که طول موج جریان های داخل افزاره بسیار بزرگتر از ابعاد این افزاره می باشند، می توانیم جزءهای طولی و عرضی جریان های نقطه ای در داخل افزاره را بدون نیاز به در نظر گرفتن اختلاف فاز این جریان ها، با یکدیگر جمع نماییم، که این جریان تولید شده را جریان تراهرتز موثر J_{eff} در منطقه فعال می نامیم.

در شکل ۴-الف و ب جریان داخل افزاره برای افزاره واحد و آرایه آن نمایش داده شده است. همانطور که از هر دو بخش این شکل مشخص است، J_{eff-x} نسبت به J_{eff-y} بزرگتر است



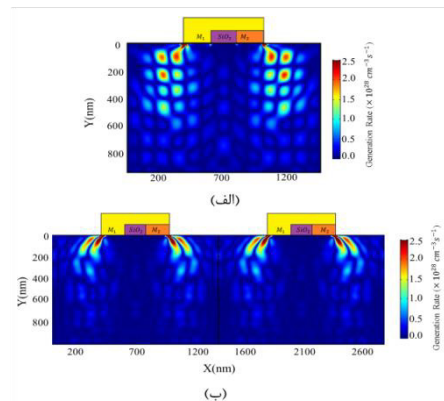
شکل ۴. جریان عرضی J_{eff-x} و طولی J_{eff-y} (الف) در افزاره واحد (ب) آرایه ای از افزاره.

فلزات و در لبه آنها باشد می توانیم به بیشترین جریان ممکن دست پیدا کنیم.



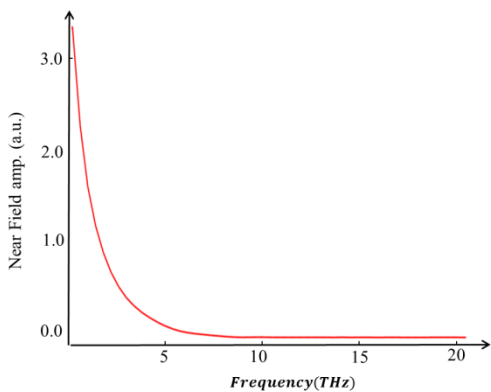
شکل ۲. نوار هدایت (الف) زمانی که هر دو فلز یکسان هستند (ب) زمانی که فلز M_2 سد شاتکی معادل $\phi = 0.8$ eV و فلز M_1 سد شاتکی معادل $\phi = 1.11$ eV دارد. (ج) میدان الکتریکی معادل قسمت ب.

پس از بررسی میدان های الکترو استاتیک افزاره، اکنون می توان با اطمینان از وجود میدان داخلی الکترو استاتیک، افزاره را برای زمانی که نور لیزر بر روی آن تابانده می شود بررسی کرد. برای این منظور با تابش یک پالس گوسی بر روی افزاره نرخ تولید حامل ها درون افزاره ناشی از جذب نور لیزر را محاسبه می نماییم.

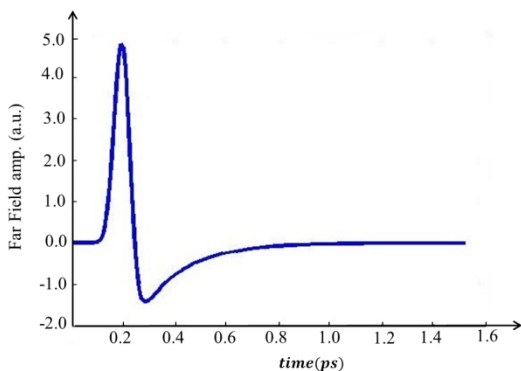


شکل ۳. نرخ تولید حامل ها (الف) در افزاره واحد (ب) آرایه ای از افزاره.

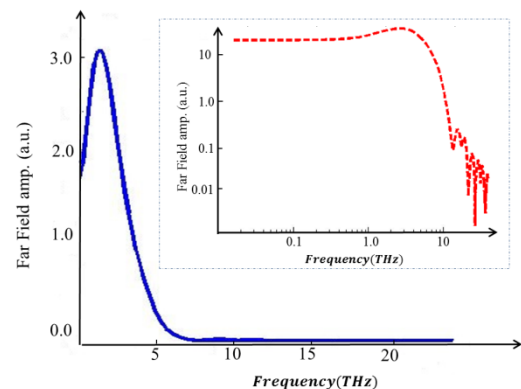
و ϕ زاویه نسبت به راستای تابش می‌باشد. در شکل ۵- الف طیف میدان نزدیک رسم گردیده است. این طیف متناسب با طیف جریان تراهرتز می‌باشد که خود طیف جریان نیز متناسب با طیف پالس گوسی ورودی می‌باشد. به بیان دیگر هر قدر پالس ورودی باریک تر باشد، طیف فرکانسی آن پهن تر و میدان تشعشی افزاره پهنای باند بزرگتری را شامل می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. الف) طیف میدان نزدیک (ب) میدان تشعشی دور در حوزه‌ی زمان (ج) طیف میدان تشعشی دور در مقیاس خطی. شکل داخلی طیف فرکانسی در مقیاس لگاریتمی را نشان می‌دهد.

که دلیل این امر قوی تر بودن میدان در این راستا نسبت به میدان در راستای y می‌باشد. از مقایسه بخش الف و ب در می‌یابیم که جریان به ازای یک افزاره در آرایه بیشتر از زمانی است که فقط یک افزاره واحد را در اختیار داریم. این امر به دلیل تغییر شرایط مرزی و به وجود آمدن میدان الکتریکی هر چند کوچکتر نسبت به لبه های فلزات، در بین دو افزاره است. این امر باعث افزایش مقدار جریان در راستای x که میدان الکتریکی به شکل موثرتری تحت تاثیر تغییر شرایط مرزی قرار دارد، می‌گردد. از طرف دیگر تغییرات جریان در واحد زمان، در لبه‌ی بالارونده بسیار سریع تر از لبه‌ی پایین رونده آن است. در نتیجه این بخش از جریان است که مسئول تولید فرکانس های بالا در موج تراهرتز خروجی می‌باشد. همچنین به دلیل کوچک بودن طول عمر حامل‌ها درون LTG-GaAs برخلاف مواد با طول عمر حامل های بزرگ، لبه‌ی پایین رونده جریان نیز به نسبت سریع تغییر می‌کند، که خود این امر نیز باعث تقویت جریان در فرکانس های بالا گردیده و توان تشعشی در فرکانس های تراهرتز را افزایش می‌دهد.

با به دست آوردن جریان تراهرتز اکنون می‌توانیم میدان تشعشی را محاسبه نماییم. همانگونه که دیدیم این جریان به شکل پالسی شبه گوسی با پهنای زمانی باریک می‌باشد. این باریک بودن پالس باعث می‌گردد، فرکانس های بالا در طیف جریان تراهرتز ایجاد گردند. در شکل ۴ مشاهده کردیم که جریان J_{eff-x} نسبت به جریان J_{eff-y} بسیار بزرگتر است، در نتیجه در محاسبه میدان تشعشی از جریان J_{eff-y} صرف نظر می‌کنیم. همچنین در این افزاره با توجه به این که آنتن وجود ندارد و به شکل خودمشعشع است و همچنین طول موج های تشعشی بسیار بزرگتر از هر واحد از افزاره می‌باشند، می‌توانیم این منبع تولید امواج تراهرتز را به شکل مجموعی از منابع نقطه‌ای داخل افزاره فرض کرده و بدون نگرانی از تداخل تشعش ناشی از این منابع نقطه ای یا همان دو قطبی های هرتزین تشعش آنها را با هم جمع کنیم. میدان تشعشی در زیر یک طول موج میدان نزدیک و پس از آن به میدان دور شهرت دارد. میدان دور و نزدیک با جریان تراهرتز به شکل زیر رابطه دارند [۱۸]:

$$\frac{1}{1+\sqrt{\epsilon}} I_{ph}(t) E_{Near}(r, t) = \frac{4\pi}{c} \quad (7)$$

$$\sin\phi \frac{\partial I_{ph}(t)}{\partial t} E_{Far}(r, t) = \frac{l_e}{4\pi\epsilon r^2} \quad (8)$$

که در این روابط c سرعت نور ϵ ضریب گذردهی الکتریکی $I_{ph}(t)$ جریان تراهرتز r فاصله از محل تابش l_e طول دو قطبی

توان پالس ورودی به فرکانس‌های به مراتب بالاتر با توان بیشتر دست یافت. هدف این مقاله نمایش توانایی استفاده از ساختار بدون بایاس پیشنهادی در مرجع [۴] برای ایجاد پالس تراهرتز در کنار موج پیوسته تراهرتز، و استفاده از آن در کاربردهایی که نیاز به افزاره‌های بدون بایاس ولی با توان بالا می‌باشد بوده است.

نتیجه گیری

در این مقاله ما به شبیه سازی یک افزاره تراهرتز پالسی بدون بایاس پرداخته، نحوه تولید و انتشار این امواج را مطالعه کرده و انتشار امواج از آنها را نمایش دادیم. با توجه به نتایج شبیه سازی دریافتیم که برای بهینه بودن جریان تراهرتز باید از دو پیوند شاتکی متفاوت به جای دو شاتکی مشابه استفاده نمود. همچنین با استفاده از آرایه به جای یک واحد از افزاره می‌توانیم جریان هر واحد از افزاره را تا پنج برابر در قله آن بزرگتر نماییم و میدان خروجی را افزایش چشمگیری دهیم. در نهایت نیز طیف را ارائه کردیم و نشان دادیم که حداکثر فرکانس خروجی وابسته به طول پالس ورودی و جنس ناحیه فعال می‌باشد.

در یک افزاره کاملاً ایده آل انتظار داریم دقیقاً طیف ورودی در خروجی ظاهر گردد، که البته با توجه جنس نیمه هادی و نوع طراحی این انحراف از پالس ایده آل متفاوت خواهد بود.

در شکل ۵-ب میدان دور در حوزه‌ی زمان رسم گردیده است. با توجه به این که میدان دور تشعشی وابستگی به مشتق جریان دارد، هرچه افزاره ایده‌آل‌تر باشد، یعنی دارای زمان بازترکیب کمتر و موبیلیتی بالاتری باشد، این شکل به شکل مشتق کامل یک تابع پالسی نزدیکتر می‌شود. در شکل ۵-ج طیف میدان دور مشاهده می‌گردد. بیشترین شدت میدان تشعشی در حوالی دو تراهرتز می‌باشد، که مکان این قله وابسته به اندازه زمانی پالس ورودی و مشخصات منطقه فعال افزاره مانند زمان بازترکیب، موبیلیتی و سرعت اشباع حامل‌ها درون ناحیه فعال می‌باشد. این میدان نسبت به میدان نزدیک دارای یک جابجایی به سمت فرکانس‌های بالاتر است که دلیل آن وابستگی میدان دور با مشتق جریان است، که این امر باعث می‌گردد، شاهد یک جابه جایی در میدان تشعشی دور نسبت به میدان نزدیک، به سمت فرکانس‌های بالاتر باشیم.

در پایان لازم به ذکر است، از افزاره‌ی شرح داده شده در این مقاله می‌توانیم هم در تولید موج پیوسته [۴] و هم در تولید پالس استفاده نماییم. در صورت استفاده در تولید موج پیوسته بهترین فرکانس تشعشی حدود ۵۰۰ گیگا هرتز محاسبه گردیده است. در حالی که در حالت پالسی می‌توان با تغییر عرض پالس و البته

مراجع

- [5] M. J. Mohammad-Zamani, M. Neshat, and M. K. Moravvej-Farshi, "Nanoslit cavity plasmonic modes and built-in fields enhance the CW THz radiation in an unbiased antennaless photomixers array," *Optics Letters*, vol. 41, no. 2, p. 420, 2016.
- [6] M. Nagel, "Photoconductive structure e.g. radiation source, for optical generation of field signals in terahertz-frequency range in bio analysis, has metallic layers formed from locations and provided in direct contact with semiconductor material," *European Patents Office*, 2013, DE102012010926 (A1)
- [7] E. Castro-Camus, J. Lloyd-Hughes, and M. B. Johnston, "Three-dimensional carrier-dynamics simulation of terahertz emission from photoconductive switches," *Physical Review B*, vol. 71, no. 19, Feb. 2005.
- [8] R. Emadi, R. Safian and A. Z. Nezhad, "Theoretical Modeling of Terahertz Pulsed Photoconductive Antennas Based on Hot-Carriers Effect," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 23, no. 4, pp. 1-9, July-Aug. 2017.
- [9] R. Emadi, N. Barani, R. Safian, and A. Z. Zhang and J. Xu, "Generation and Detection of THz Waves," *Introduction to THz Wave Photonics*, pp. 27-48, 2009.
- [2] O. Imafuji, B. P. Singh, Y. Hirose, Y. Fukushima, and S. Takigawa, "High power subterahertz electromagnetic wave radiation from GaN photoconductive switch," *Applied Physics Letters*, vol. 91, no. 7, p. 071112, 2007.
- [3] K. Kan, J. Yang, A. Ogata, S. Sakakihara, T. Kondoh, K. Norizawa, I. Nozawa, T. Toigawa, Y. Yoshida, H. Kitahara, K. Takano, M. Hangyo, R. Kuroda, and H. Toyokawa, "Radially polarized terahertz waves from a photoconductive antenna with microstructures," *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 22, p. 221118, Mar. 2013
- [4] M. J. Mohammad-Zamani, M. K. Moravvej-Farshi, and M. Neshat, "Unbiased continuous wave terahertz photomixer emitters with dissimilar Schottky barriers," *Optics Express*, vol. 23, no. 15, p. 19129, 2015.

- Safavi-Naeini, "A Global Approach for Modeling and Analysis of Edge-Coupled Traveling-Wave Terahertz Photoconductive Sources," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 7, pp. 1952–1966, 2010
- [17] S. Selberherr, "Analysis and Simulation of Semiconductor Devices," 1984.
- [18] J. Shan and T. F. Heinz, "Terahertz Radiation from Semiconductors," *Topics in Applied Physics Ultrafast Dynamical Processes in Semiconductors*, pp. 1–56, Dec. 2004..
- [19] S. Lodha, D. B. Janes, and N.-P. Chen, "Fermi level unpinning in ex situ Schottky contacts on n-GaAs capped with low-temperature-grown GaAs," *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 23, pp. 4452–4454, Oct. 2002.
- [20] P. Torkaman, S. Darbari and M. J. Mohammad-Zamani, "Design and Simulation of a Piezotronic GaN-Based Pulsed THz Emitter," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 17, pp. 3645-3651, 1 Sept.1, 2018.
- Nezhad, "Hybrid Computational Simulation and Study of Terahertz Pulsed Photoconductive Antennas," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 37, no. 11, pp. 1069–1085, Apr. 2016.
- [10] G. Carpintero, G. M. L. Enrique, H. Hartnagel, S. Preu, and A. V. Räisänen, *Semiconductor terahertz technology: devices and systems at room temperature operation*. Chichester: Wiley, 2015
- [11] C. Criollo and A. G. Avila, "Simulation of photoconductive antennas for terahertz radiation," *Ingeniería e Investigación*, vol. 35, no. 1, pp. 60–64, 2015.
- [12] N. Burford and M. El-Shenawee, "Computational modeling of plasmonic thin-film terahertz photoconductive antennas," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 33, no. 4, p. 748, 2016.
- [13] N. Barani, R. Emadi, A. Amirhosseini, and R. Safian, "Accurate calculation of excited photocurrent in terahertz photoconductive antennas by using energy balance transport model," *2014 Third Conference on Millimeter-Wave and Terahertz Technologies (MMWATT)*, 2014.
- [14] N. Khiabani, Y. Huang, Y.-C. Shen, and S. Boyes, "Theoretical Modeling of a Photoconductive Antenna in a Terahertz Pulsed System," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 4, pp. 1538–1546, 2013.
- [15] M. Khabiri, M. Neshat, and S. Safavi-Naeini, "Hybrid Computational Simulation and Study of Continuous Wave Terahertz Photomixers," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 605–616, 2012.
- [16] M. Neshat, D. Saeedkia, L. Rezaee, and S.